

Poglavlje 7

Zaštita izolacije od prenapona

U zaštitna sredstva od atmosferskih prenapona spadaju zaštitna užad na vodovima i postrojenjima, gromobranski štapovi u postrojenjima, iskrišta i odvodnici prenapona. Sastavni deo svih uredjaja za zaštitu od prenapona predstavlja uzemljenje uredjaja.

Uloga iskrišta (zaštitne armature) na izolatorima vazdušnih vodova objašnjena je pri tumačenju povratnog preskoka. Ponekad se paralelno provodnim izolatorima aparata postavljaju koordinirajuća iskrišta čija je uloga da dovedu do preskoka pre nego što dodje do kvara izolacije aparata. Nažalost, iako je zaštita iskrištima izuzetno jeftina i pouzdana zaštita, ona ima dve mane:

- Sečenje atmosferskog prenapona proizvodi naponski talas vrlo velike strmine na čelu. Ovakav talas može da ošteti međunavojnu izolaciju aparata sa namotajima kao što su merni ili energetski transformatori.
- Iskrište predstavlja uredjaj koji ograničava prenapon, ali pravi kratak spoj nakon reagovanja, tako da se mora aparat na kome je iskrište priključeno isključiti delovanjem neke od zaštita od kratkih spojeva.

Iz gornjih razloga se primena iskrišta na aparatnim izolatorima ne preporučuje. Zaštitna iskrišta na vodovima čine dopunsku prenaponsku zaštitu koja zajedno sa odvodnicima prenapona čini kompletan sistem za prenaponsku zaštitu.

Najvažniju vrstu prenaponske zaštite čine odvodnici prenapona, pa će o toj vrsti zaštite biti najviše reči.

7.1 Odvodnici prenapona

Odvodnici prenapona su aparati koji imaju nelinearne otpornike vezane prema zemlji koji pri nailasku prenapona smanjuju svoju otpornost odvođeći deo energije u zemlju. Nestankom prenapona oni ponovo povećavaju svoju otpornost na prvobitnu vrednost.

Prema konstrukciji se savremeni odvodnici mogu podeliti na dve grupe:

- Silicijum-karbidni (**SiC**) ili klasični odvodnici prenapona
- Metal oksidni ili cink-oksidni (**ZnO**) odvodnici prenapona

7.1.1 Konstrukcija SiC odvodnika

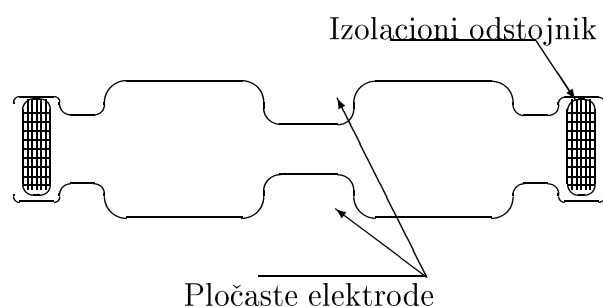
Prvi odvodnici prenapona za zaštitu elektroenergetskih mreža od atmosferskih prenapona su počeli da se primenjuju oko 1930 godine. Odvodnik prenapona u svom delovanju treba da obavi dva zadatka:

- za vreme porasta prenaponskog talasa treba da deluje vrlo brzo kao sklopni aparat uključujući malu vrednost otpornosti prema zemlji, koji će najveći deo energije atmosferskog pražnjenja da odvede u zemlju,
- nakon nestanka opasnog prenapona odvodnik treba da isključi vezu sa zemljom što pre, a najkasnije pri prvom prolasku struje kroz nulu.

Uredjaj koji ispunjava oba zahteva je odvodnik prenapona koji ima redno vezane nelinearne otpornike i iskrišta. Iskrište ima ulogu sklopnog aparata koji uključuje kada napon predje određenu vrednost (**napon reagovanja**), a isključuje kada struja prolazi kroz nulu. Nelinearni otpornik služi da ograniči propratnu struju koja protiče usled dejstva radnog napona nakon što je prenaponski talas prošao. Upotrebom nekoliko iskrišta i nelinearnih otpornika vezanih na red može se konstruisati odvodnik za više radne napone.

Odvodnici sa tanjirastim iskrištem

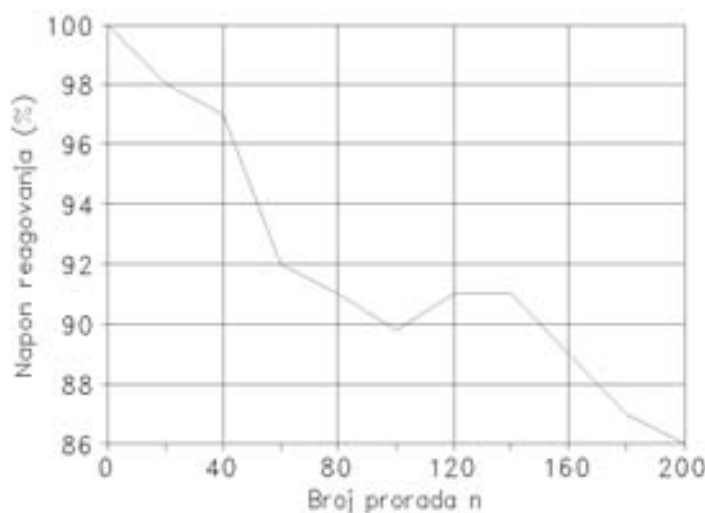
Najjednostavnija konstrukcija odvodnika je sa tanjirastim sistemom iskrišta, koji je prikazan na slici 7.1. Tanjirasta metalna iskrišta su tako profilisana da daju relativno homogeno polje na mestu gde su najbliža, u cilju što manjeg rasipanja preskočnog napona. Na ivicama su



Slika 7.1: Konstrukcija tanjirastih iskrišta

pomoću prstenastih izolacionih odstožnika tanjirasta iskrišta fiksirana na određeno rastojanje.

Veći broj reagovanja odvodnika prenapona dovodi do postepene degradacije elektroda iskrišta usled pojave neravnina, što prouzrokuje blago opadanje napona reagovanja iskrišta. Na slici 7.2 prikazan je procentualni pad napona reagovanja iskrišta u funkciji broja reagovanja, prema [86]. Kriva na slici 7.2 pokazuje da iskrišta odvodnika prenapona menjaju

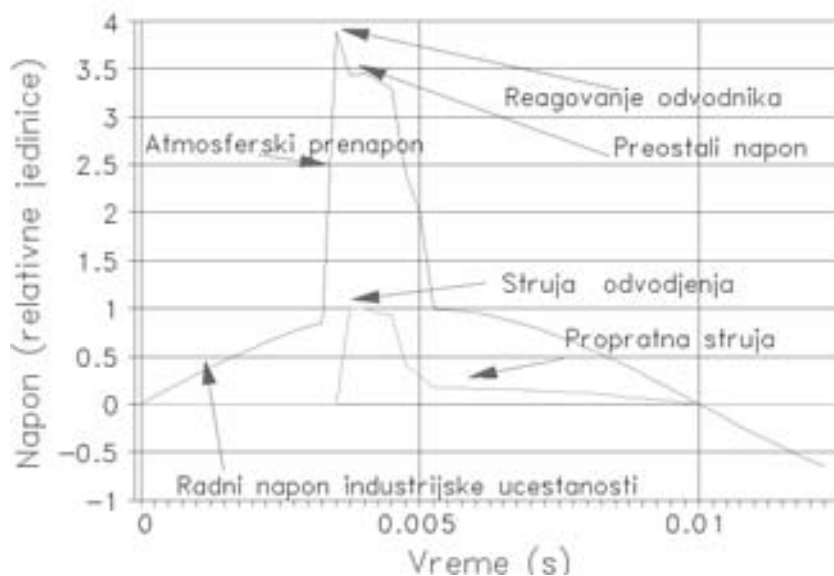


Slika 7.2: Primer promene preskočnog napona tanjirastih iskrišta u funkciji broja prorada

svoje karakteristike, pa ih zato treba povremeno kontrolisati. Degradacija karakteristika odvodnika je posledica proticanja propratne struje industrijske učestanosti nakon nestanka prenapona koji je izazvao reagovanje odvodnika.

Na slici 7.3 prikazan je dijagram napona i struja pri nailasku atmosferskog prenapona

na odvodnik. Atmosferski prenapon se superponira na napon industrijske učestanosti.

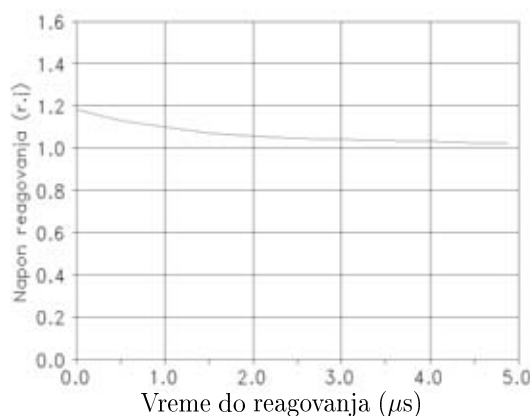


Slika 7.3: Dijagram napona i struja pri reagovanju odvodnika

Odvodnik reagovanjem ograničava prenapon. U trenutku reagovanja odvodnika, počinje kroz odvodnik da protiče struja odvodjenja sve dok postoji prenapon. Nakon nestanka prenapona, pod uticajem radnog napona protiče propratna struja, koja je ograničena nelinearnim otpornicima odvodnika. U trenutku kada propratna struja prolazi kroz nulu, luk na iskrištima se gasi i odvodnik ponovo ima beskonačan otpor kao i pre reagovanja.

Napon reagovanja iskrišta zavisi od strmine talasa koji nailazi na odvodnik. Iskrište se tako oblikuje da karakteristika reagovanja odvodnika (volt-sekundna karakteristika iskrišta) bude što manje zavisna od strmine talasa koji nailazi na odvodnik. Tipična volt-sekundna karakteristika iskrišta odvodnika prenapona prikazana je na slici 7.4. Može se uočiti da za čak vrlo kratka vremena do reagovanja napon reagovanja odvodnika ima porast od samo nekoliko procenata.

Da bi se osigurala zaštita od atmosferskih prenapona, a sprečilo reagovanje odvodnika na dugotrajnije napone (sklopne napone ili napone industrijske učestanosti), iskrišta klasičnih SiC odvodnika prenapona su tako napravljena da imaju minimalan napon reagovanja upravo pri dejstvu talasa koji imaju strminu čela karakterističnu za atmosferske prenapone, dok im je napon reagovanja za talase manje strmine nešto veći, što otežava njihovo reagovanje na sklopne i privremene (dugotrajne) prenapone. Na slici 7.5 prikazana je karakteristika reagovanja odvodnika prenapona za širi dijapazon vremena do reagovanja. Ucertane su dve granične krive izmedju kojih se nalazi napon reagovanja odvodnika, koji poseduje izvesno slučajno rasipanje.



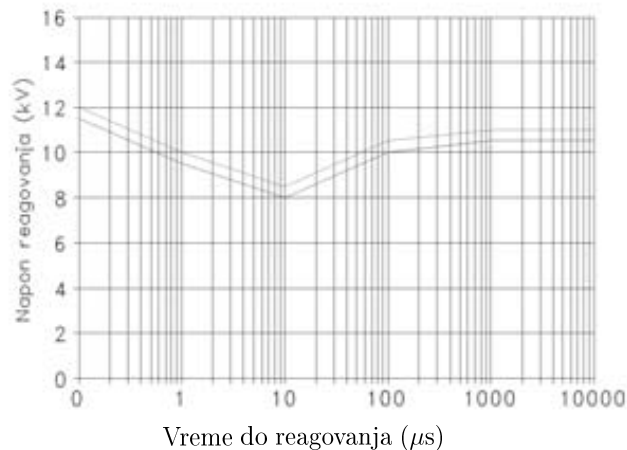
Slika 7.4: Tipična volt-sekundna karakteristika iskrišta odvodnika prenapona

Sistem redno vezanih iskrišta se može predstaviti u zamenskoj šemi rednom vezom kondenzatora, kao i očno vezanim kondenzatorima prema zemlji koji predstavljaju parazitne kapacitivnosti iskrišta. Zamenska šema odvodnika prenapona pre reagovanja prikazana je na slici 7.6. U ovoj šemi kapacitivnosti C_i predstavljaju kapacitivnosti iskrišta, a C_z predstavljaju kapacitivnosti prema zemlji. Na slici 7.6 prema [86] zanemarene su parazitne kapacitivnosti prema provodniku pod naponom. Nelinearni otpornici nisu ucrtani, jer njihovo prisustvo nema bitan uticaj na kapacitivnu raspodelu napona. Na slici 7.6 a) prikazana je ekvivalentna šema, a na slici 7.6 b) raspodela napona duž odvodnika.

Da bi se osigurala ravnomerna raspodela napona izmedju iskrišta kod odvodnika za visoke napone, postavljaju se elementi za raspodelu napona od linearnih ili nelinearnih otpornika ili kondenzatora koji su vezani paralelno sa iskrištima. U normalnom radu kroz otpornike ili kondenzatore za raspodelu napona protiče vrlo mala struja, ali oni omogućavaju da sva iskrišta u jednoj koloni budu pod istim naponom.

Savremeni odvodnici imaju sistem za raspodelu napona koji se sastoji iz RC kola sa linearnim ili nelinearnim otpornicima kojima se postiže ravnomernost raspodele napona duž pojedinih blokova odvodnika. Osim toga, podesnim sistemom za podešavanje raspodele napona može se uticati na oblik volt-sekundne karakteristike iskrišta.

Na slici 7.7 prikazan je kompleksan sistem za raspodelu napona duž odvodnika. Na slici su šematski prikazane serijske veze iskrišta i odgovarajući nelinearni otpornici i kondenzatori paralelno sa iskrištima. Osim toga, za grupe iskrišta se vezuju takodje paralelno RC kola, kao što je to prikazano na slici, prema [86]. Na slici 7.7 prikazana je električna šema sistema za regulaciju napona, bez ucrtanih nelinearnih SiC blokova odvodnika prenapona, koji se nalaze izmedju iskrišta. Glavno električno kolo čine iskrišta, sa kojima su na red vezani nelinearni blokovi, koji nisu ucrtani. Pored glavnog strujnog kola postoje još tri stru-

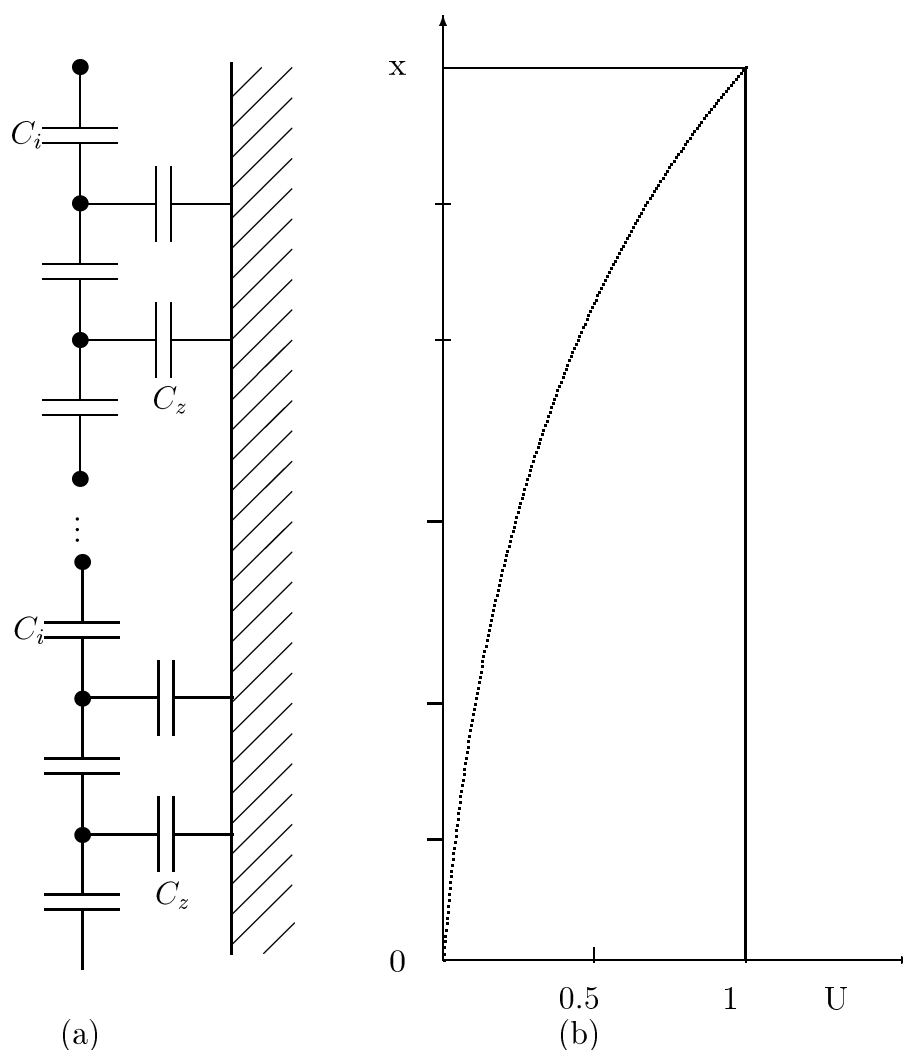


Slika 7.5: Volt-sekundna karakteristika odvodnika za širi dijapazon vremena do reagovanja

jna kola za regulaciju napona. Desno od glavnog strujnog kola se nalaze paralelni spojevi nelinearnih otpornika R_2 i kondenzatora C_2 koji su povezani paralelno sa svakim iskrištem. Levo od iskrišta se nalaze paralelni spojevi nelinearnih otpornika R_1 i kondenzatora C_1 koji premošćuju sistem od po 3 iskrišta. Sa leve strane od ovog sistema za raspodelu napona nalaze se kondenzatori C_3 koji premošćuju ukupno 6 iskrišta. Povoljnom kombinacijom sistema za ravnomernu raspodelu napona može se u potpunosti regulisati raspodela napona na iskrištima. Sklopovi RC koji premošćuju samo po jedno iskrište nazivaju se elementima za individualnu kontrolu raspodele napona, a sklopovi koji premošćuju više iskrišta nazivaju se elementima za grupnu kontrolu raspodele napona.

Sistemom za raspodelu napona može se podešavati oblik volt-sekundne karakteristike reagovanja odvodnika prenapona. U cilju pravilne koordinacije izolacije za mreže različitih naznačenih napona se postavljaju različiti zahtevi u pogledu volt-sekundnih karakteristika reagovanja SiC odvodnika prenapona.

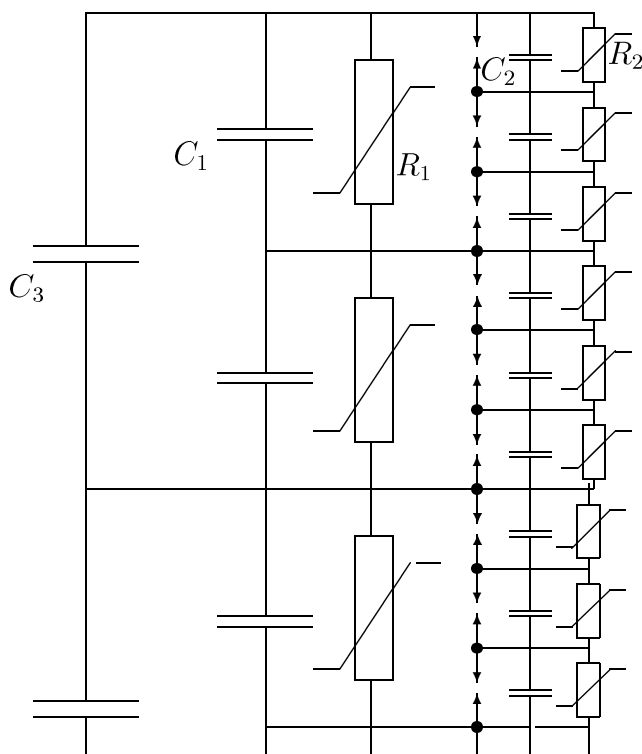
Kod odvodnika za srednje napone visina odvodnika je relativno mala, parazitne kapacitivnosti prema zemlji nemaju veliku ulogu na raspodelu napona, pa je volt-sekundna karakteristika reagovanja bliska horizontalnoj liniji (a), kao na slici 7.8. Pri višim naponima se javlja veći uticaj parazitnih kapacitivnosti, koje deformišu raspodelu napona. Pomoću paralelnih otpornika se kontroliše raspodela napona duž stuba odvodnika, ali na takav način da se dobije minimalni napon reagovanja na atmosferske prenapone, a viši napon reagovanja na sklopne i privremene prenapone, čime se odvodnik štiti od energetskog preopterećenja. Na slici 7.8 je ova kriva obeležena sa (b). U mrežama još viših napona u kojima se viši



Slika 7.6: a) Ekvivalentna šema odvodnika pre reagovanja, b) Raspodela napona duž odvodnika

ograničavanje i sklopnih prenapona u cilju sniženja izolacionog nivoa opreme, potrebno je da volt-sekundna karakteristika reagovanja iskrišta bude ravna i u oblasti strmina čela koje odgovaraju sklopnim prenaponima na slici 7.8 (kriva c). Da bi se sprečilo nepotrebno reagovanje odvodnika na sklopne prenapone, potrebno je da rasipanje napona reagovanja bude što je moguće uže.

Prema [86] jedan od načina upravljanja oblikom volt-sekundne karakteristike iskrišta je korišćenje različitih kombinacija otpornika u sklopovima RC kola za kontrolu raspodele napona. Na slici 7.9 levo prikazan je sklop za upravljanje naponom, koji se sastoji iz serijske veze tri RC kola. Dva RC kola su sa nelinearnim otpornicima R_1 i jedno sa linearnim otpornikom R_2 . Sva iskrišta obeležena sa I imaju isti napon reagovanja. Kapacitivnosti

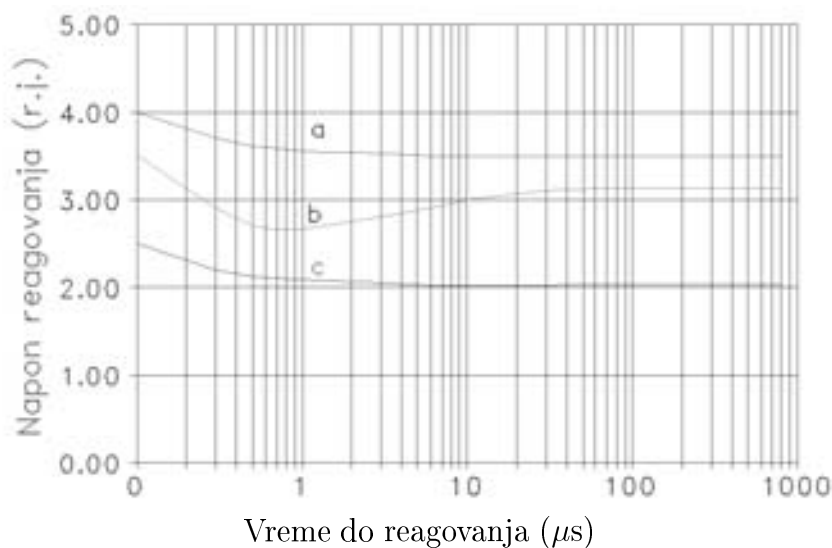


Slika 7.7: Kompleksan sistem za raspodelu napona na odvodniku

kondenzatora i iskrišta u ekvivalentnoj šemi su obeleženi sa C . Označeni su naponi U_1 , $U_2 = U_1$ i U_3 koji vladaju na pojedinim iskrištima. Na dijagramu desno prikazani su naponi U_1 , U_2 i U_3 , u zavisnosti od struje koja protiče kroz sistem za regulaciju napona na iskrištima. Vidi se da su naponi U_1 i U_2 nelinearna funkcija struje, a napon U_3 raste linearno sa strujom.

Sistem se tako podešava da pri delovanju radnog napona i relativno niskih prenapona koji odgovaraju sklopnim prenaponima postoji ravnomerna raspodela napona duž iskrišta. Pri delovanju naznačenog napona odvodnika, koji se definiše kao najviši napon pri kome se luk posle reagovanja odvodnika još uvek može ugasi, postoji identičan napon na iskrištima sa linearnim i nelinearnim otporima. Zbog ravnomerne raspodele napona duž odvodnika i relativno niskog napona koji na iskrištima vlada, potrebno je da prodje duže vremena da dodje do reagovanja.

Naprotiv, kada deluju visoki atmosferski prenaponi, tada dolazi do neravnomerne raspodele napona pri kojoj iskrišta koja su šantirana linearnim otporom preuzimaju znatno viši napon od iskrišta šantiranih nelinearnim otporom, što dovodi do njihovog bržeg reagovanja, što se manifestuje kao niži napon reagovanja pri dejstvu strmih talasa.



Slika 7.8: Volt-sekundne karakteristike reagovanja odvodnika, a) za srednjenaponske odvodnike, b) za visokonaponske odvodnike sa povišenim naponom reagovanja na sklopne prenapone, c) za odvodnike u mrežama u kojima se ograničavaju sklopni prenaponi

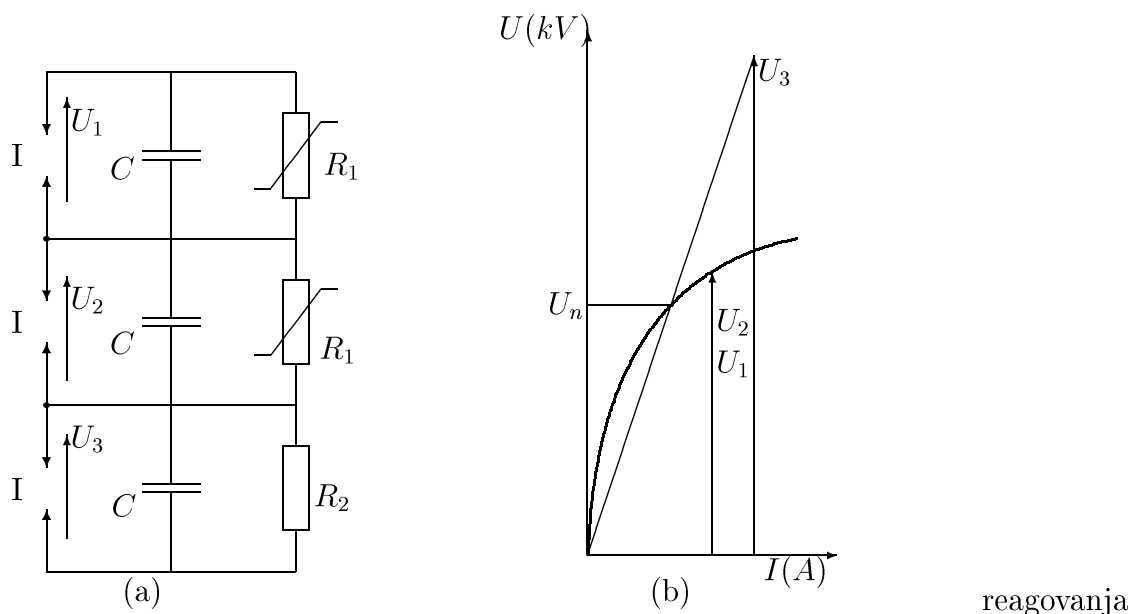
Povoljnom konstrukcijom sistema za raspodelu napona duž odvodnika se može optimizirati karakteristika reagovanja odvodnika da bude u što većoj saglasnosti sa volt-sekundnom karakteristikom izolacionog sistema koji se štiti odvodnikom prenapona.

7.1.2 Odvodnici sa iskrištem sa magnetskim oduvavanjem luka

Klasični (silicijum-karbidni) odvodnici prenapona koji se koriste za ograničavanje sklopnih i atmosferskih prenapona mogu se graditi sa poboljšanom konstrukcijom iskrišta kod koje se luk razvlači pod dejstvom magnetskog polja u komori za gašenje luka. Usled aktivne uloge iskrišta u procesu dejonizacije luka, javlja se povišeni pad napona na luku koji ograničava propratnu struju i može da izazove smanjivanje propratne struje i gašenje luka pre prirodnog prolaza propratne struje kroz nulu.

Na slici 7.10 prikazana je šema jednog rešenja iskrišta sa magnetskim oduvavanjem luka. Na slici je prikazana otvorena komora, koja je inače kompaktna, sa uzanim prostorom izmedju dva diska, u kojem gori električni luk. Kod gotovo svih rešenja elektrode imaju oblik dva jezička.

Na red sa komorom za gašenje luka nalaze se kalem i nelinearni otpornik u paralelnoj vezi. Kalem proizvodi magnetsko polje koje svojim dejstvom izaziva izduživanje električnog luka, čime se povećava njegov otpor i olakšava gašenje. Da bi se postigao što bolji efekat,

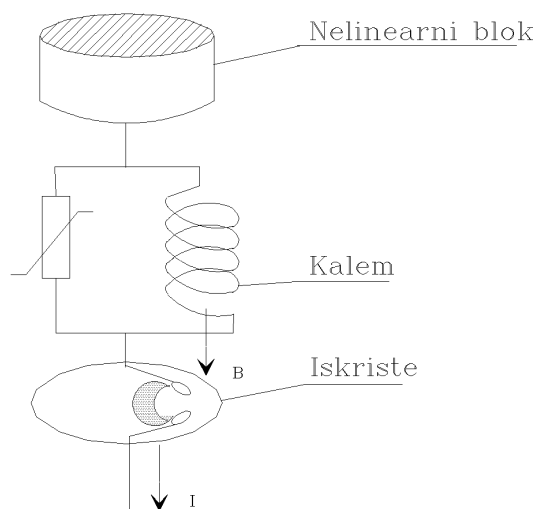


Slika 7.9: a) Primer sistema za upravljanje oblikom volt-sekundne karakteristike odvodnika, b) Volt-amperske karakteristike elemenata za upravljanje raspodelom napona

kalemovi se postavljaju i ispred i iza iskrišta.

Za vreme delovanja atmosferskog prenapona kroz odvodnik protiče velika udarna struja. Kalem predstavlja veliku induktivnu impedansu, tako da najveći deo struje prolazi kroz paralelni nelinearni otpornik. Na taj način se izbegava razvlačenje luka pri delovanju atmosferskih prenapona, pa se smanjuje pad napona na luku i ukupan preostali napon na odvodniku nakon reagovanja. Kada prodje atmosferski prenapon, na odvodnik nastavlja da deluje napon industrijske učestanosti koji izaziva proticanje propratne sporo promenljive struje. Ova struja prolazi kroz kalem, koji predstavlja manju impedansu od nelinearnog otpornika, što ima za posledicu proizvodnju magnetskog polja koje deluje na luk razvlačeći ga i izazivajući dodatni pad napona. Zbog toga se struja brže smanjuje i dolazi do gašenja luka.

Pri reagovanju na sklopne prenapone dolazi do proticanja struje kroz kalem, a znatno manji deo protiče kroz paralelni otpornik, jer je struja znatno niže učestanosti nego u slučaju atmosferskih prenapona. Zbog toga dolazi do delovanja magnetskog polja na luk u iskrištu, što izaziva povećanje pada napona na luku i ograničenja struje kroz odvodnik. Time se nelinearni otpornici od SiC štite od previše velikog energetskeg naprezanja odvodnika.



Slika 7.10: Konstrukcija odvodnika sa iskrištem sa magnetskim oduvavanjem luka

Nelinearni otpornici od silicijum karbida

Na red sa iskrištem nalazi se valjkasti nelinearni otpornik. Posle reagovanja odvodnika prenapona pad napona koji vlada na nelinearnom otporniku naziva se preostali napon odvodnika. U jednom užem opsegu struja pad napona na nelinearnom otporniku može se predstaviti eksponencijalnom funkcijom:

$$I = k U^{\alpha} \quad (7.1)$$

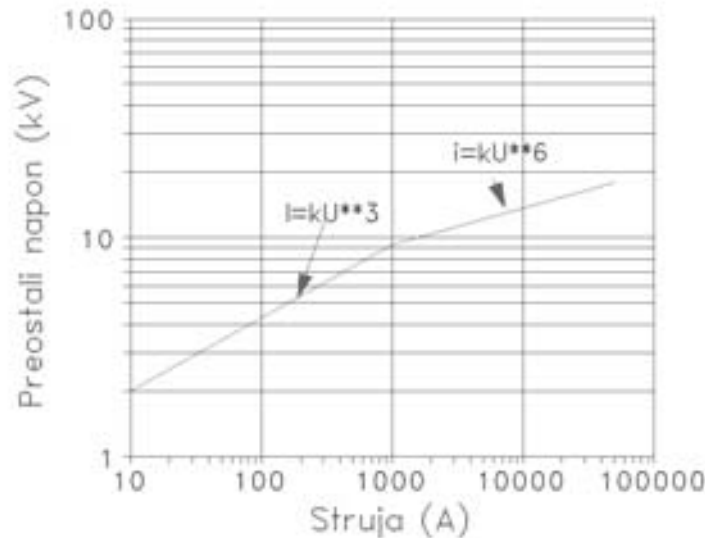
gde su:

α —koeficijent nelinearnosti koji se kod SiC odvodnika kreće u opsegu $2 < \alpha < 6$.

k —konstruktivna konstanta odvodnika prenapona. Povećanjem visine diska odvodnika i smanjivanjem prečnika opada konstanta k . Povećanjem prečnika odvodnika raste energetska sposobnost (sposobnost da podnese veće struje pri istom grejanju).

Karakteristika preostalog napona ili volt-amperaska karakteristika odvodnika prenapona prikazana je na slici 7.11. Ova karakteristika se dobija ispitivanjem odvodnika prenapona udarnim strujama različitih amplituda. Ona pokazuje kolika je vrednost preostalog napona pri delovanju određene udarne struje. Karakteristika odvodnika prenapona na slici 7.11 nacrtana je pojednostavljeno u logaritamskoj razmeri za struju, pod pretpostavkom da za struje do 1000 A koeficijent nelinearnosti ima vrednost $\alpha = 3$, a za veće struje ima vrednost $\alpha = 6$ [86].

Presek dela stuba odvodnika prenapona prikazan je na slici 7.12. Oznake na slici 7.12



Slika 7.11: Tipična volt-amperska karakteristika nelinearnog SiC rezistora

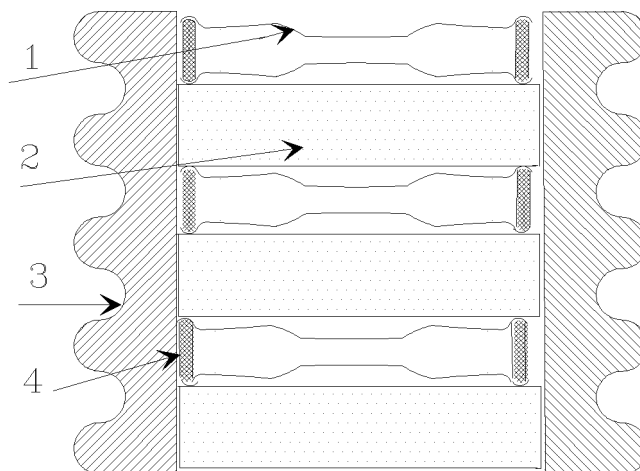
imaju sledeće značenje:

1. tanjirasto iskrište,
2. nelinearni otpornik u obliku diska,
3. porculansko kućište u kome su smešteni elementi odvodnika
4. nelinearni otpornik u vidu prstena za raspodelu napona.

Disk od nelinearnog otpornog materijala je sa gornje strane metaliziran da bi se ostvario bolji metalni kontakt sa pločama iskrišta.

Nelinearni otpornik ima dvostruku ulogu.

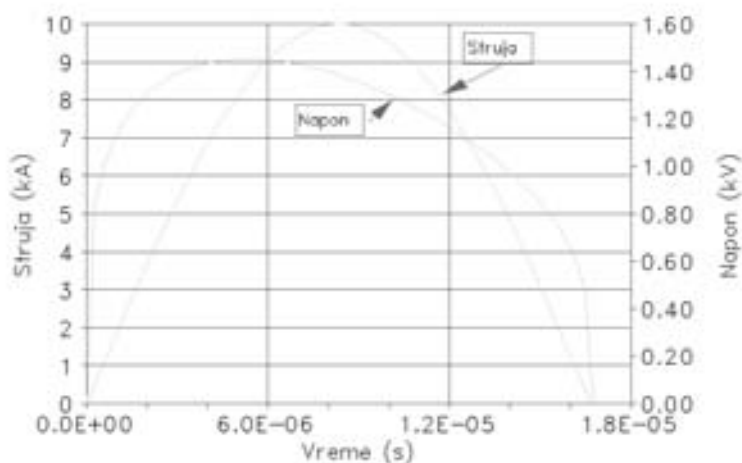
- Pri delovanju prenapona uloga mu je da smanji otpor i propusti veliku struju pražnjenja, a da pri tome zadrži preostali napon (pad napona na nelinearnom otporniku) u granicama koje neće da ugroze izolaciju opreme koja se štiti,
- Posle nestanka prenapona uloga nelinearnog otpornika je da ograniči propratnu struju koja protiče pod dejstvom radnog napona tako da se luk usled ove propratne struje na iskrištu može ugasiti u prvoj nuli.



Slika 7.12: Presek dela stuba odvodnika prenapona

Silicijum-karbidni otpornik se sastoji od presovanog praha sa odgovarajućom masom za ispunu u cilindričnim kalupima. Karakteristike otpornika zavise od veličine zrna, oblika zrna, prethodne termičke obrade i sredstva za ispunu.

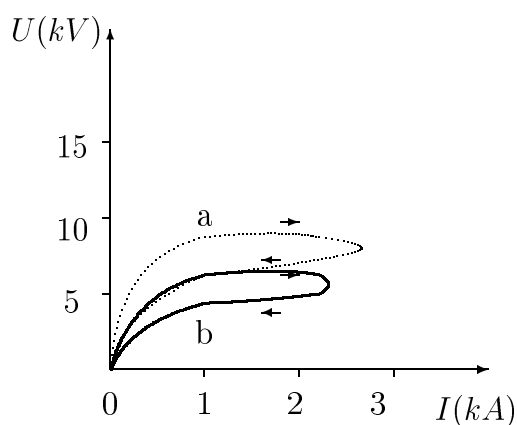
Silicijum karbid ima negativan temperaturni koeficijent otpora, što znači da se sa porastom temperature njegova otpornost smanjuje. Zbog toga volt-amperaska karakteristika odvodnika zavisi od oblika i trajanja strujnog talasa kojim se odvodnik ispituje. Tipičan oblik strujnog talasa primenjenog direktno na nelinearni otpornik i odgovarajućeg pada napona na otporniku prikazani su na slici 7.13. Sa slike 7.13 se može uočiti da preostali napon ima



Slika 7.13: Udarne struja i preostali napon na nelinearnom otporniku

maksimum koji nastupa pre maksimuma struje. Zbog zagrevanja otpornika preostali napon počinje da opada iako struja još uvek raste, pa se zbog toga javlja pomeraj između napona i struje i veća strmina napona na čelu nego na začelju talasa pri istoj strmini struje.

Volt-amperska karakteristika nelinearnog otpornika pri porastu i opadanju struje obrazuje histerezisnu petlju, jer je pri porastu struje temperatura otpornika niža, pa on ima veći otpor i viši pad napona nego u procesu opadanja struje kada je otpornik već zagrejan. Na slici 7.14 prikazane su dve volt-amperske krive nelinearnog otpornika za različita vremena čela talasa. Vidi se da volt-amperska kriva koja odgovara strmijem talasu (kriva a) ima višu vrednost napona od one koja odgovara sporijem čelu talasa (kriva b)[86]. Nelinearni



Slika 7.14: Volt-amperska karakteristika za različite strmine čela. a) vreme čela $6 \mu s$ b) vreme čela $240 \mu s$

otpornik ima volt-sekundnu karakteristiku preostalog napona koja pokazuje povećanje preostalog napona pri delovanju strujnih talasa strmog čela. Oblik volt-sekundne karakteristike otpornika posledica je zagrevanja otpornika pri delovanju sporijih talasa, što vodi ka smanjivanju preostalog napona, ali i uticaja induktivnosti stuba otpornika pri delovanju vrlo strmih strujnih talasa.

Kod *SiC* odvodnika prenapona se koeficijent promene preostalog napona sa strminom može prikazati u obliku sledećeg empirijskog izraza [89]:

$$K = 1 + 0,015 \frac{di/dt}{(di/dt)_s} \quad (7.2)$$

gde su:

K —koeficijent korekcije preostalog napona usled strmine talasa različite od standardne,

$(di/dt)_s$ —strmina standardnog strujnog talasa ($kA/\mu s$),

di/dt —strmina posmatranog strujnog talasa kroz odvodnik u ($kA/\mu s$).

Osnovne karakteristike SiC odvodnika

Prema propisima se definišu osnovne karakteristike klasičnog odvodnika prenapona, koje se utvrđuju ispitivanjima i na osnovu kojih se proverava ispravnost izbora odvodnika za odredjen sistem i lokaciju. Definicije osnovnih karakteristika odvodnika date su u sledećem tekstu.

1. **Naznačeni (nazivni, nominalni)** napon odvodnika prenapona predstavlja maksimalan napon industrijske učestanosti za koji je odvodnik projektovan da radi ispravno. Ako je odvodnik priključen na napon koji je viši od njegovog nazivnog napona, u slučaju reagovanja odvodnik neće biti u stanju da prekine propratnu struju gašenjem luka na iskrištu, što dovodi do termičkog razaranja odvodnika.
 - (a) Naznačeni napon se koristi kao referentni parametar pri izboru ostalih radnih karakteristika odvodnika
 - (b) Naznačeni napon može da bude priključen na odvodnik neko odredjeno vreme, a da odvodnik pri tome ne promeni svoje radne karakteristike.
2. **Nazivna frekvencija** odvodnika prenapona predstavlja frekvenciju sistema za koji je odvodnik predvidjen (na primer: 50 Hz u Evropi i 60 Hz u SAD).
3. **Nazivna struja odvodjenja** odvodnika prenapona predstavlja temenu vrednost udarne struje standardnog oblika 8/20 ($8\mu s$ vreme trajanja čela talasa i $20\mu s$ trajanje začelja).

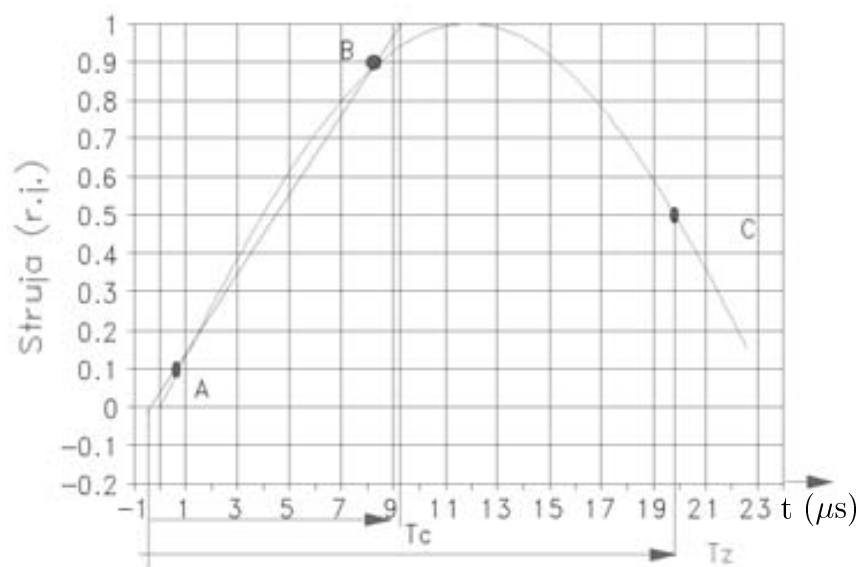
Strujni udarni talasi za ispitivanje odvodnika prenapona se generišu specijalnim uređjima za dobijanje udarnih struja koji rade na principu rasterećivanja baterija kondenzatora kroz objekat ispitivanja. Definicija oblika talasa data je na slici 7.15. Vreme čela talasa je trajanje linearizovanog čela koje se dobija provlačenjem prave kroz tačke koje odgovaraju vrednostima 0,1 i 0,9 od temene vrednosti struje. Vreme čela je označeno vektorom T_c . Trajanje začelja je vreme potrebno da na silaznom delu krive struja opadne na 0,5 od temene vrednosti. Vreme se meri od početka linearizovanog čela talasa (tačka O). Vreme začelja označeno je vektorom T_z .

Standardne nazivne vrednosti struja odvodjenja SiC odvodnika su 10000 A, 5000 A, 2500 A i 1500 A.

Napomena: Razlikujemo dva tipa odvodnika nazivne vrednosti struja pražnjenja koje su veće ili jednake 10000 A. To su:

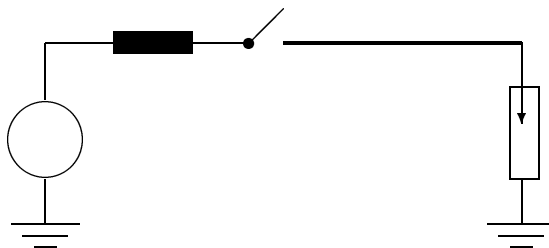
- Odvodnici za normalne uslove rada (koji štite samo od atmosferskih prenapona)
- Odvodnici za teške uslove rada (koji štite i od sklopnih prenapona)

Odvodnike prenapona svrstavamo u **klase** prema nazivnoj struji odvodjenja.



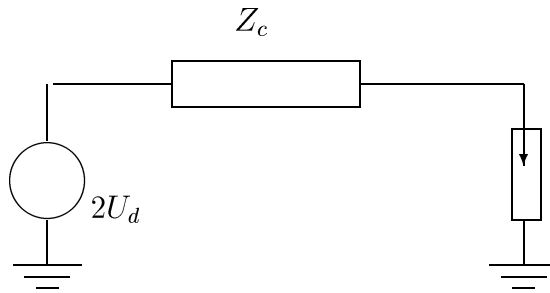
Slika 7.15: Definicija standardnog oblika strujnog talasa

4. **Dugotrajna udarna podnosiva struja** ili podnosiva struja rasterećenja vodova je amplituda struje približno pravougaonog oblika trajanja od $500\mu s$ do $3200\mu s$, u zavisnosti da li je odvodnik za normalne ili teške uslove rada i u zavisnosti od klase odvodnika u odnosu na dugotrajne struje pražnjenja. Dugotrajne struje koje se mogu pojaviti kroz odvodnik nastaju zbog visokih sklopnih prenapona koji su prouzrokovani sklopnim operacijama kao što su uključenje voda u praznom hodu, uključenje velike kondenzatorske baterije, isključenje voda sa brzim automatskim ponovnim uključanjem. Pri ovim manipulacijama dolazi do pojave sklopnih prenapona amplitude U_{max} , koji odvodnik predviđen za teške uslove rada treba da ograniči. Pri reagovanju kroz odvodnik protiče približno pravougaona struja, čija se amplituda može približno odrediti na osnovu šeme sa slike 7.16. Na slici 7.17 prikazana je ekvivalentna šema po Petersen-



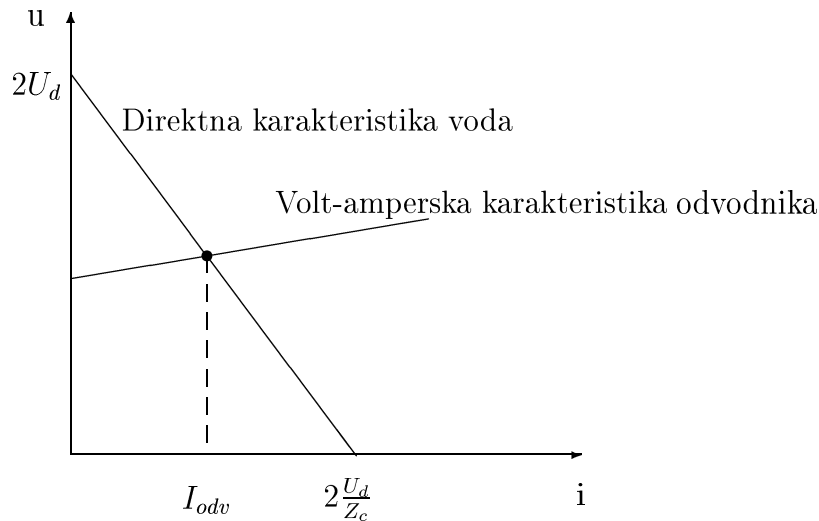
Slika 7.16: Ekvivalentna šema za određivanje struje rasterećenja dugih vodova

ovom pravilu u kojoj se smatra da induktivnost izvora suprotstavlja veliku impedansu proticanju pravougaone struje, a odvodnik prenapona održava praktično konstantan napon na sebi. Generator u šemi na slici 7.16 ima vrednost napona koja je identična naponu U_{max} koji vlada na vodu u trenutku reagovanja odvodnika. Polovina tog napona $U_d = U_{max}/2$ se kreće kao direktni talas ka odvodniku, a druga polovina se kao inverzni talas $U_i = U_{max}/2$ vraća ka početku voda, da bi se reflektovao od induktivnosti izvora. Na slici 7.18 prikazano je određivanje amplitude pravougaone struje



Slika 7.17: Petersenova šema za određivanje struje rasterećenja dugih vodova

primenom Beržeronovog dijagrama. Struja kroz odvodnik se može dobiti primenom



Slika 7.18: Određjivanje struje rasterećenja kroz odvodnik primenom Beržeronovog dijagrama

sledećeg izraza:

$$I_{odv} = \frac{U_{max} - U_{odv}}{Z_c} \quad (7.3)$$

gde su:

I_{odv} –pravougaona struja usled sklopnog talasa koja protiče kroz odvodnik,

U_{odv} –preostali napon na odvodniku usled proticanja struje I_{odv} ,

Z_c –karakteristična impedansa voda.

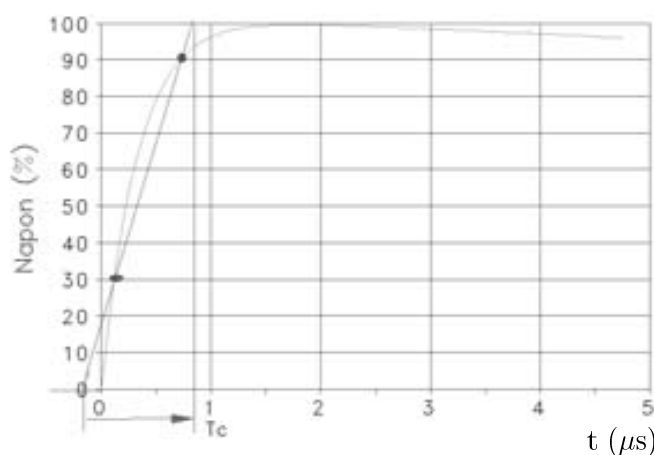
Trajanje struje u μs je:

$$T = 2 \frac{d}{v} \quad (7.4)$$

gde je d –dužina voda u km , a v –brzina prostiranja talasa u $km/\mu s$.

5. **Napon reagovanja industrijske učestanosti** predstavlja najnižu temenu vrednost podeljenu sa $\sqrt{2}$ napona industrijske učestanosti koja izaziva reagovanje odvodnika prenapona. Ova vrednost napona mora biti bar 1,5 puta veća od nazivnog napona odvodnika, da bi se sa sigurnošću sprečilo reagovanje odvodnika pri dejstvu privremenih prenapona.
6. **Standardni udarni napon reagovanja odvodnika** ili 100 % udarni napon reagovanja predstavlja minimalnu temenu vrednost napona standardnog naponskog talasa oblika 1, 2/50 koji uvek izaziva reagovanje odvodnika.

Definicija čela standardnog oblika naponskog talasa data je na slici 7.19. Vreme čela



Slika 7.19: Definicija čela standardnog oblika naponskog talasa

talasa se definiše kao trajanje linearizovanog čela dobijenog povlačenjem prave kroz 0,3 i 0,9 od temene vrednosti napona. Presek linearizovanog čela talasa sa apscisnom osom naziva se konvencionalnim početkom talasa. Trajanje začelja talasa se definiše kao vreme od konvencionalnog početka talasa do trenutka kada talas opadne na 50 % od pune amplitude.

7. **Napon reagovanja odvodnika na čelu talasa** predstavlja napon reagovanja odvodnika pri primeni talasa koji linearno raste u vremenu do trenutka reagovanja. Ovaj napon se dobija primenom talasa veće strmine čela od standardnog atmosferskog udarnog talasa, tako da do reagovanja odvodnika dolazi na linearno rastućem delu udarnog naponskog talasa.
Prilikom odredjivanja napona reagovanja na čelu talasa se koristi talas standardnog oblika $1,2/50 \mu s$, ali amplitude koja je viša od 100 % napona reagovanja odvodnika. U tom slučaju će odvodnik reagovati pre nego što talas postigne maksimum.
8. **Volt-sekundna karakteristika odvodnika** predstavlja zavisnost napona reagovanja odvodnika od vremena do reagovanja.
9. **Preostali napon** odvodnika predstavlja pad napona na odvodniku kada kroz njega protiče nazivna struja odvodjenja.
10. **Volt-amperska karakteristika odvodnika** ili karakteristika preostalog napona predstavlja zavisnost preostalog napona od amplitude struje pražnjenja. Proizvođači u katalogima daju vrednost preostalog napona pri primeni standardnih strujnih udarnih talasa amplitude 50 %, 100% i 200% od nazivne struje odvodjenja odvodnika. Preostali napon se može navesti i za neke druge vrednosti struja i za struje drugih oblika (na primer za struje koje odgovaraju sklopnim udarima).
11. **Pratna struja** odvodnika predstavlja struju koja protiče posle nestanka prenapona, usled dejstva radnog napona mreže.

U cilju koordinacije izolacije definišu se sledeće karakteristike klasičnog odvodnika prenapona:

- **Zaštitni nivo odvodnika** , koji predstavlja najviši od sledeća tri napona:

1. Napon reagovanja odvodnika na čelu talasa podeljen sa 1,15
2. Standardni udarni napon reagovanja odvodnika
3. Preostali napon odvodnika (pri nazivnoj struji odvodjenja)

odnosno:

$$U_{zas} = \text{Max} \{U_c/1.15, U_{100\%}, U_{pre}\} \quad (7.5)$$

gde su:

U_{zas} —zaštitni nivo odvodnika,

U_c —napon reagovanja na čelu talasa,

U_{pre} —preostali napon odvodnika.

- **Koeficijent zaštite** predstavlja odnos podnosivog udarnog napona izolacije i zaštitnog nivoa odvodnika, odnosno:

$$k_{zas} = \frac{U_{pod}}{U_{zas}} \quad (7.6)$$

gde je U_{pod} —podnosivi udarni napon štice izolacije.

U tablici 7.1 dati su koeficijenti zaštite u funkciji naznačenog napona mreže. Može

Najviši radni napon mreže (kV)	7,2	12	24	38	123	245	420
Koeficijent zaštite k_{zas}	2,0	1,7	1,4	1,3	1,3	1,3	1,2

Tabela 7.1: Koeficijent zaštite u zavisnosti od naznačenog napona mreže

se uočiti da se koeficijent zaštite smanjuje sa povećanjem naznačenog napona sistema. U sistemima srednjih napona znatno je teže ograničiti nivo atmosferskih prenapona, pa se pri koordinaciji izolacije podnosivi udarni napon izolacije bira da bude dosta veći od naznačenog napona. Naprotiv, kod visokonaponskih mreža nivo atmosferskih prenapona u odnosu na naznačeni napon mreže je relativno niži, pa se može zato definisati i manji koeficijent zaštite.

7.2 Cink-oksadni odvodnici prenapona

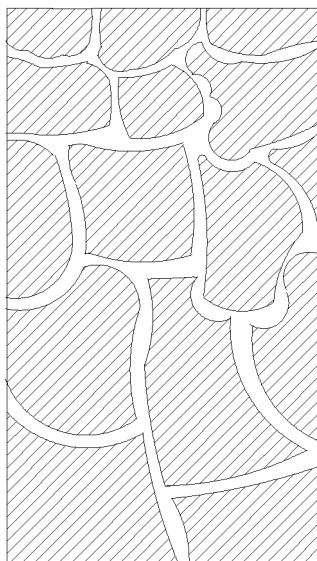
Danas u svetu počinje masovna upotreba metal-oksidnih ili cink-oksidnih (**ZnO**) odvodnika prenapona umesto klasičnih *SiC* zbog jednostavnije konstrukcije i povoljnijih zaštitnih karakteristika. Kod izgradnje novih postrojenja se uglavnom ugradjuju *ZnO* odvodnici, mada se klasični odvodnici u starijim postrojenjima ne zamenjuju kada uspešno obavljaju svoju funkciju. Glavna prednost *ZnO* odvodnika prenapona je što nemaju iskrište i što imaju povoljniji oblik volt-amperske karakteristike otpornika.

7.2.1 Konstrukcija ZnO odvodnika

Cink-oksadni odvodnici prenapona sadrže samo diskove od nelinearnog otpornog materijala koji su zatvoreni u odgovarajućem cilindričnom kućištu. Danas se gotovo uopšte ne prave

cink-oksidni odvodnici prenapona sa iskrištem, mada su se u početku primene pojavljivali modeli i sa iskrištem. Diskovi od nelinearnog otpornog materijala dobijaju se sinterovanjem granula ZnO sa dodatkom aditiva u tečnom stanju najčešće u obliku metalnih oksida kao što su na primer Bi_2O_3 i Sb_2O_3 , u vazduhu na temperaturi od oko $1200^\circ C$. Nelinearne karakteristike materijala zavise isključivo od vrste i odnosa aditiva u materijalu. Diskovi od nelinearnog otpornog materijala vezuju se redno putem metaliziranih kontaktnih površina, tako da obrazuju sklopove od više rednih diskova. Naznačeni napon odvodnika zavisi isključivo od broja elementarnih otpornika u vidu diskova u sklopu.

Posmatranjem mikroskopske strukture materijala nelinearnih otpornika može se uočiti prisustvo mikroskopskih granula ZnO prečnika 10 do $20\ \mu m$, između kojih se nalazi međugranularni prostor sastavljen od primesa. Može se smatrati da u električnom pogledu granule predstavljaju provodnike, a međugranularni prostor barijere koje bivaju probijene pri delovanju povišenog napona. Na slici 7.20 prikazana je šematski mikroskopska struktura materijala nelinearnog otpornika. Zrnasta struktura otpornika treba da je što homogenija,



Slika 7.20: Šematski prikaz mikroskopske strukture nelinearnog otpornika ZnO odvodnika

tako da se statistički gledano sva zrna ponašaju na isti način bez obzira gde se nalaze unutar diska nelinearnog otpornika.

Do osnovnih osobina ZnO otpornika može se doći na osnovu sledećeg jednostavnog opisa:

- Može se smatrati da su pojedina zrna od ZnO u električnom smislu povezana redno

i paralelno preko barijera koje čine medjugranularni prostor. Mikroskopski gledano, električno polje je jako u prostoru između zrna i slabo u zrnima.

- Struja koja protiče kroz otpornik bira putanju koja ima minimalan broj spojeva (barijera) između zrna. Ukoliko je smeša homogena, struja će se ravnomerno raspoređivati po celom poprečnom preseku otporničkog diska. Zbog toga je broj strujnih putanja kojima se najlakše struja zatvara kroz otpornik srazmerna poprečnom preseku diska.
- Omski gubici na otporniku se mikroskopski gledano najvećim delom pojavljuju upravo na prostoru između zrna, mada se zbog homogene strukture čini da se toplota oslobađa u celokupnoj zapremini otpornika.
- Pri neizmenjenoj mikrostrukturi otpornika, naznačeni napon odvodnika srazmeran je dužini otpornika.
- Sposobnost provodjenja struje srazmerna je površini poprečnog preseka.
- Donja granica naznačenog napona odvodnika je multipl broj kontakata po dužini nelinearnog otpornika. Pad napona na svakoj barijeri je oko $2,5\text{ V}$ pri režimu u kome odvodnik pokazuje maksimalnu nelinearnost (kada struja kroz jednu barijeru prelazi $4 \cdot 10^{-4}\text{ A/cm}^2$). Za normalnu veličinu zrna od $10 - 20\mu\text{m}$ to daje $120 - 250\text{ V/mm}$ debljine uzorka. Na osnovu ovoga se definiše dužina uzorka za određenu primenu.
- Za određenu gustinu struje unutrašnja jačina polja i prosečna gustina gubitaka po jedinici zapremine su obrnuto proporcionalni veličini zrna, pa se na taj način mogu podešavati karakteristike.

Poprečni presek otpornika za određenu veličinu granula se određuje na bazi sledećih parametara:

- Očekivane amplitude struje udarnog pražnjenja,
- Očekivane dugotrajne struje usled sklopnih operacija (rasterećenje električnog naboja dugih vodova ili sklopne operacije sa velikim baterijama kondenzatora koje se mogu isprazniti kroz odvodnik),
- Maksimalne dozvoljene temperature odvodnika,
- Sposobnosti odvodjenja oslobodjene toplote sa odvodnika.

7.2.2 Osobine ZnO odvodnika prenapona

Najvažnija prednost *ZnO* odvodnika prenapona je vrlo izražen koeficijent nelinearnosti otpornika, koji je znatno veći nego kod *SiC*. Koeficijent nelinearnosti na širokom opsegu struja nije konstantan i kreće se od $\alpha = 20$ do $\alpha = 50$. Veoma zgodan način prezentacije strujno-naponske karakteristike otpornika u eksponencijalnom obliku je preko referentnih napona i struja, odnosno:

$$\frac{I}{I_{ref}} = \left(\frac{U}{U_{ref}} \right)^\alpha \quad (7.7)$$

gde su:

I_{ref} , U_{ref} —referentni napon i struja koji definišu jednu tačku na volt-amperskoj karakteristici,

α —koeficijent nelinearnosti.

Koeficijent nelinearnosti se menja sa režimom i može se izraziti u određenoj radnoj tački putem sledećeg izraza:

$$\alpha(U) = \frac{d(\ln I)}{d(\ln U)} \quad (7.8)$$

Koeficijent nelinearnosti α je ključna veličina od koje zavisi efikasnost prenaponske zaštite *ZnO* odvodnicima prenapona. Za određivanje kompletne karakteristike nelinearnog otpornika u širokom opsegu struja koristi se logaritamska srednja vrednost koeficijenta nelinearnosti.

$$\bar{\alpha} = \frac{\ln(I_{max}/I_o)}{\ln(U_{max}/U_o)} \quad (7.9)$$

gde su:

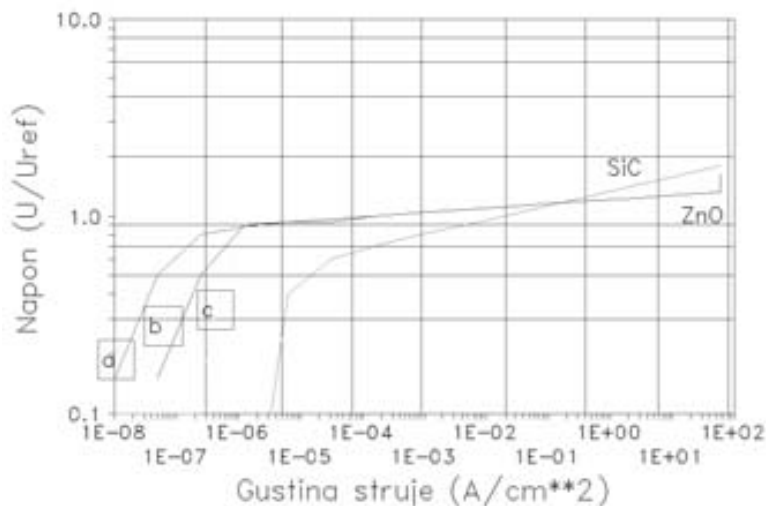
I_o —dozvoljena stalna struja kroz odvodnik,

I_{max} —maksimalna udarna struja pražnjenja koja se očekuje kroz odvodnik,

U_o —napon na odvodniku pri struji I_o ,

U_{max} —napon na odvodniku pri struji I_{max} .

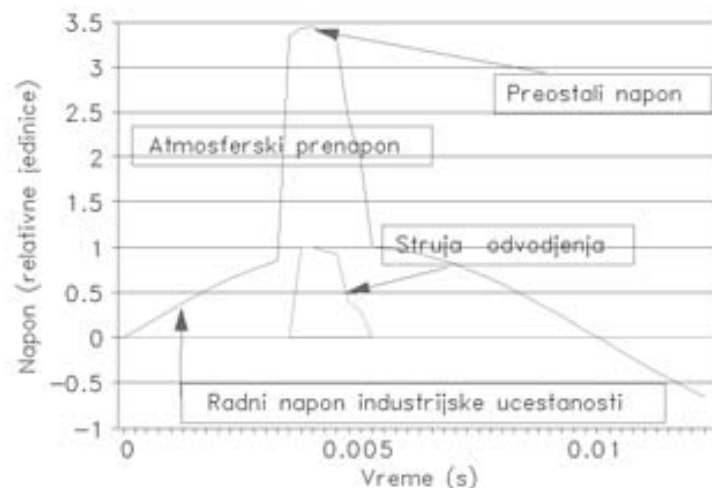
Na slici 7.21 prikazane su volt-amperske karakteristike silicijum-karbidnog i cink-oksidge odvodnika prenapona za vrlo širok dijapazon struja. Karakteristike na slici 7.21 date su u funkciji gustine struje kroz blok, tako da mogu da važe za bilo koji poprečni presek bloka nelinearnog otpornika, a napon je dat u relativnim jedinicama u odnosu na usvojeni referentni



Slika 7.21: Volt-amperska karakteristika ZnO i SiC otpornika: a) ZnO na 25°C , b) ZnO na 100°C , c) ZnO na 150°C

napon, koji je izabran tako da bi pri njemu *ZnO* odvodnik mogao trajno da radi. Vidi se da je gustina struje kroz *ZnO* odvodnik pri referentnom naponu ispod 10^{-5} A/cm^2 , dok je gustina struje kod *SiC* otpornika pri istom naponu nekoliko mA/cm^2 . Ovako velika struja koja bi trajno proticala kroz otpornik izazvala bi termičko uništenje *SiC* odvodnika. Zbog toga se klasični silicijum-karbidni odvodnici moraju primenjivati sa iskrištem, dok se savremeni *ZnO* odvodnici prenapona rade bez iskrišta. Na slici 7.22 prikazan je atmosferski prenapon superponiran na radni napon industrijske učestanosti ograničen odvodnikom prenapona. Mogu se uočiti sledeće razlike između *SiC* i *ZnO* odvodnika prenapona:

- *SiC* odvodnik reaguje kada naidje prenapon viši od napona reagovanja, nakon čega napon pada na preostali napon. U trenutku reagovanja odvodnika dolazi do naglog smanjivanja napona, što može da izazove prelazni režim.
- *ZnO* odvodnik prenapona nema napon reagovanja tako da posle porasta napona preko kolena dolazi do provodjenja struje, bez naglog prelaska iz režima u kome provodi vrlo male struje u režim provodjenja velike struje.
- *ZnO* odvodnik prenapona nema propratnu struju nakon prestanka delovanja prenapona jer se sa nestankom prenapona odvodnik automatski vraća u stanje velike otpornosti kada kroz odvodnik prolaze vrlo male struje.



Slika 7.22: Skica prenapona superponiranog na radni napon ograničenog ZnO odvodnikom

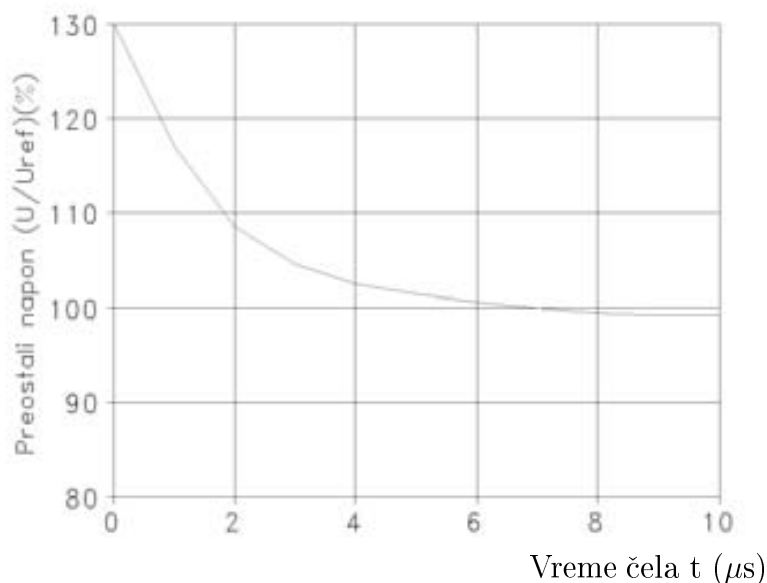
Zbog toga što ZnO odvodnik nema iskrišta, ovi odvodnici se mogu vezivati paralelno u cilju povećanja energetske mogućnosti. Klasični SiC odvodnici se nisu smeli vezivati paralelno, jer bi uvek jedan od odvodnika reagovao pre drugoga i preuzimao kompletno strujno opterećenje. Naprotiv, ZnO odvodnici mogu da dele strujno opterećenje ravnomerno, što omogućava da oba odvodnika budu rasterećena primenom njihove paralelne veze.

Kod primene vrlo strmih strujnih talasa na nelinearne otpornike, može se uočiti izvesno povećanje preostalog napona sa porastom strmine talasa. Do ovog povećanja napona dolazi iz dva razloga:

1. Pri delovanju sporijih talasa dolazi do većeg zagrevanja cink-oksidskih blokova, što izaziva smanjenje otpornosti blokova i sniženja preostalog napona,
2. Pri delovanju vrlo strmih talasa se može smatrati da sam stub nelinearnog otpornika odvodnika prenapona ima izvesnu induktivnost, koja prouzrokuje povećan pad napona pri proticanju struje na čelu atmosferskog talasa.

Kod ZnO odvodnika zavisnost preostalog napona od strmine talasa je nešto manje izražena nego kod SiC odvodnika, ali o njoj treba voditi računa kod analize prenaponske zaštite zbog većeg uticaja na nivo prenapona na šticevoj opremi, jer je kod ZnO odvodnika prenapona upravo preostali napon jedini parametar odvodnika koji utiče na nivo prenapona. Kod SiC prenapona strmina talasa ima znatno veći uticaj na napon reagovanja nego na

preostali napon. Zbog toga proizvođači cink-oksidnih odvodnika obavezno daju relativni porast preostalog napona pri primeni talasa veće strmine u odnosu na primenu strujnog talasa standardne strmine. Na slici 7.23 prikazana je relativna zavisnost preostalog napona u odnosu na preostali napon pri standardnoj strmini u funkciji vremena čela talasa. Sa

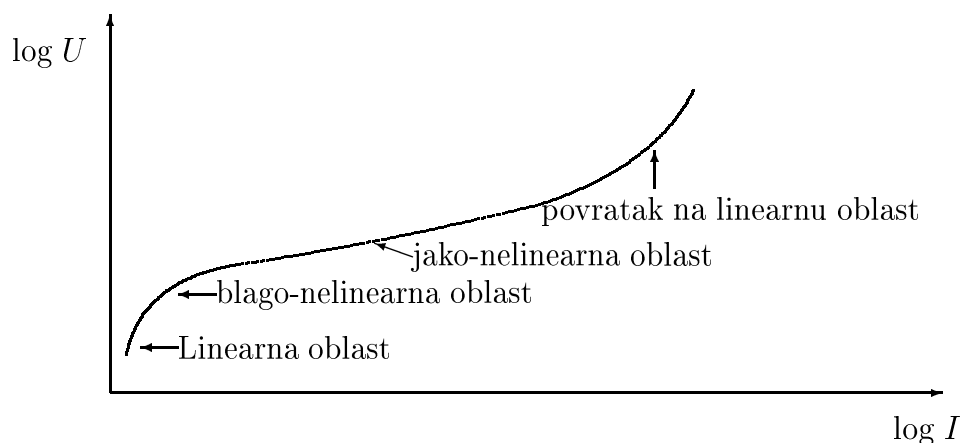


Slika 7.23: Preostali napon u funkciji strmine talasa na ZnO odvodniku prenapona

slike 7.23 se može uočiti da za strmine strujnih talasa koje odgovaraju vremenu čela talasa od oko $1\mu s$ povećanje napona iznosi oko 20 % u odnosu na standardnu strminu strujnog talasa oblika $8/20\mu s/\mu s$. Za talas čije je trajanje čela tačno $8\mu s$ preostali napon je jednak preostalom naponu pri standardnoj struji odvodjenja. Za talase čije je trajanje čela duže preostali napon je još niži. Najveća promena preostalog napona u odnosu na referentni napon je u slučaju vrlo strmih talasa, što pokazuje da je u toj oblasti dominantan uticaj induktivnosti odvodnika.

Kada se kompletna karakteristika preostalog napona odvodnika posmatra u širokom dijapazonu struja, ona se može podeliti na 4 oblasti. Ove oblasti su prikazane na slici 7.24. Može se uočiti da pri vrlo malim strujama postoji skoro linearna zavisnost između napona i struje (radi se o strujama u oblasti μA). Ova oblast se naziva linearnom oblašću i u njoj pored omske komponente postoji i značajna kapacitivna komponenta struje.

Pri naponima koji su viši od trajnog radnog napona dolazi do značajnog povećanja struje (ovo je blago-nelinearna oblast), koja se zove još i kolenom krive preostalog napona. Ulaskom u ovu oblast nastaje proces intenzivnijeg provodjenja struje što se ponekad poredi sa reagovanjem klasičnog odvodnika.



Slika 7.24: Šematski prikaz volt-amperske karakteristike ZnO sa naznakom pojedinih oblasti

Pri još većim strujama dolazimo u jako nelinearnu oblast, u kojoj vrlo velikim promena struje odgovaraju jako male promene napona.

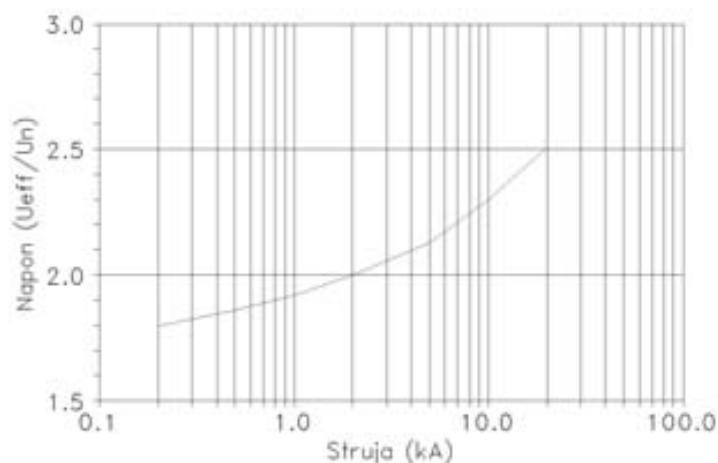
Pri još većim strujama, koje se u praksi ne pojavljuju, a u laboratorijskim uslovima se teško postižu, otpornik se ponovo vraća u stanje u kome počinje značajan porast napona sa porastom struje.

Za ispravno funkcionisanje odvodnika prenapona važne su sve oblasti njegovog rada. Oblik krive preostalog napona je vrlo osetljiv na sastav smeše od koje je odvodnik napravljen, jer vrlo mala promena u količini aditiva u osnovnoj smesi ZnO utiče na promenu oblika krive preostalog napona odvodnika.

Zaštitna karakteristika ZnO odvodnika prenapona je definisana krivom preostalog napona u opsegu udarnih struja koje se pojavljuju kroz odvodnik pri delovanju prenapona. Na slici 7.25 prikazana je zaštitna karakteristika ZnO odvodnika prenapona prema [91]. Napon je izražen kao multipl naznačenog napona odvodnika prenapona. Proizvodjači daju zaštitnu karakteristiku tablično za standardne strujne talase $8/20 \mu s/\mu s$ za atmosferske prenapone i za strujni talas čela dužeg od $30 \mu s$ za sklopne prenapone. Tipičan oblik podataka koje daju proizvodjači o preostalom naponu dat je u tablici 7.2.

7.2.3 Najvažnije karakteristike ZnO odvodnika prenapona

Kod ZnO odvodnika prenapona se definišu tri bitne karakteristike na bazi kojih se odvodnici deklariraju i biraju:

Slika 7.25: Zaštitna karakteristika ZnO odvodnika prenapona

- Naznačeni napon odvodnika je napon koji služi za raspoznavanje odvodnika,
- Trajni radni napon je efektivna vrednost maksimalnog radnog napona industrijske frekvencije na koji se odvodnik može trajno priključiti.
- Volt-sekundna karakteristika podnosivog napona industrijske frekvencije predstavlja krivu efektivne vrednosti napona industrijske učestanosti u funkciji trajanja napona, koji odvodnik može da podnese. Ova karakteristika opisuje sposobnost ZnO odvodnika da podnosi privremene prenapone.

Vrsta talasa		Sklopni talas		Atmosferski talas			
Maks.trajni napon kV_{eff}	Naznačeni napon kV_{eff}	1 kA $k\hat{V}$	3 kA $k\hat{V}$	5 kA $k\hat{V}$	10 kA $k\hat{V}$	20 kA $k\hat{V}$	40 kA $k\hat{V}$
312	253	630	650	736	769	845	921
336	272	670	699	792	827	909	990
360	292	727	750	850	888	975	1063

Tabela 7.2: Izvod iz tablice preostalih napona kod ZnO odvodnika prenapona iz kataloga proizvođača

Zaštitna karakteristika ZnO odvodnika prenapona predstavlja maksimalnu vrednost između sledeća tri napona:

- preostalog napona pri dejstvu strujnog talasa strmog čela,
- preostalog napona pri dejstvu nazivne struje odvodjenja standardnog atmosferskog strujnog talasa $8/20 \mu s/\mu s$.
- preostalog napona pri dejstvu struje usled sklopnog prenapona.

Standardne vrednosti nazivnih struja odvodjenja za ZnO odvodnike prenapona su date u tablici 7.3.

20	10	5	2,5	1,5
----	----	---	-----	-----

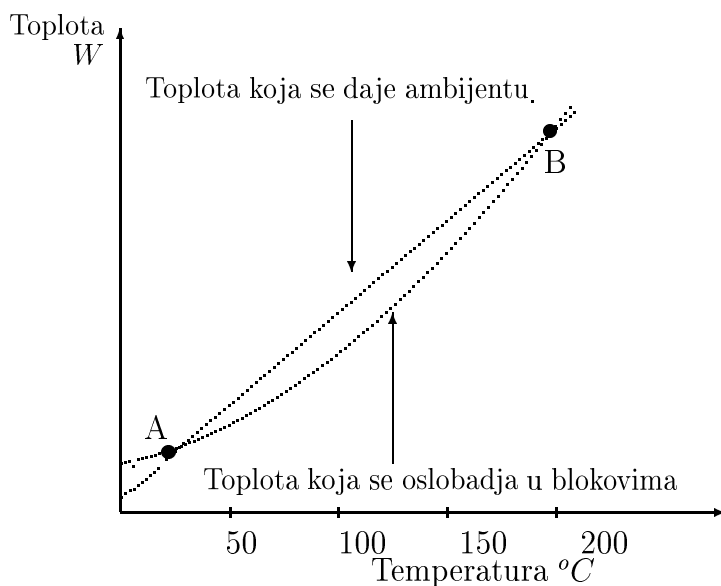
Tabela 7.3: Standardne vrednosti nazivnih struja odvodjenja (kA)

Važna karakteristika koja služi za kontrolu istovetnosti karakteristike preostalog napona svakog rezistorskog bloka je *referentni napon*, koji se meri pri jednosmernoj struji u opsegu od 0.01 mA do 1 mA i koju nazivamo referentnom strujom. Ukoliko su vrednosti referentnog napona u dozvoljenim granicama, tada se takav blok može ugraditi u odvodnik.

7.2.4 Termička stabilnost ZnO odvodnika prenapona

Kroz nelinearne otpornike ZnO odvodnika prenapona pri normalnom radnom režimu stalno protiče vrlo mala struja koja odgovara oblasti velikih otpornosti odvodnika na krivoj preostalog napona. Ova struja izaziva gubitke na odvodniku koji se pretvaraju u toplotu. Zbog toga dolazi do zagrevanja blokova od otpornika u normalnom radnom režimu. U slučaju odvodjenja udarnih struja se generiše znatno veća količina toplote zbog velike amplitude struje, bez obzira što je otpornost blokova smanjena. Generisana toplota se predaje izolacionom kućištu odvodnika, a sa kućišta se toplota odvodi u okolni vazduh.

Osnovni uslov toplotne stabilnosti odvodnika je uspostavljanje ravnoteže između generisane toplote i odvedene toplote u okolni prostor. U slučaju kada je generisana količina toplote u blokovima veća od odvedene količine toplote, dolazi do zagrevanja blokova, što izaziva smanjivanje njihove otpornosti i povećanje struje. Ovo izaziva dalji porast temperature. Porast temperature usled narušavanja toplotne stabilnosti odvodnika naziva se **termički pobeg**. Na slici 7.26 prikazan je proces narušavanja termičke stabilnosti odvodnika. Odvedena količina toplote sa odvodnika približno linearno raste sa temperaturom:



Slika 7.26: Termička stabilnost blokova

$$Q = K \cdot S \cdot (T - T_o) \quad (7.10)$$

gde su:

Q –količina toplote koja se odvodi hladjenjem (J),

K –koeficijent odvodjenja toplote ($J/m^2, ^\circ C$),

S –površina hladjenja (m^2),

T –temperatura odvodnika ($^\circ C$),

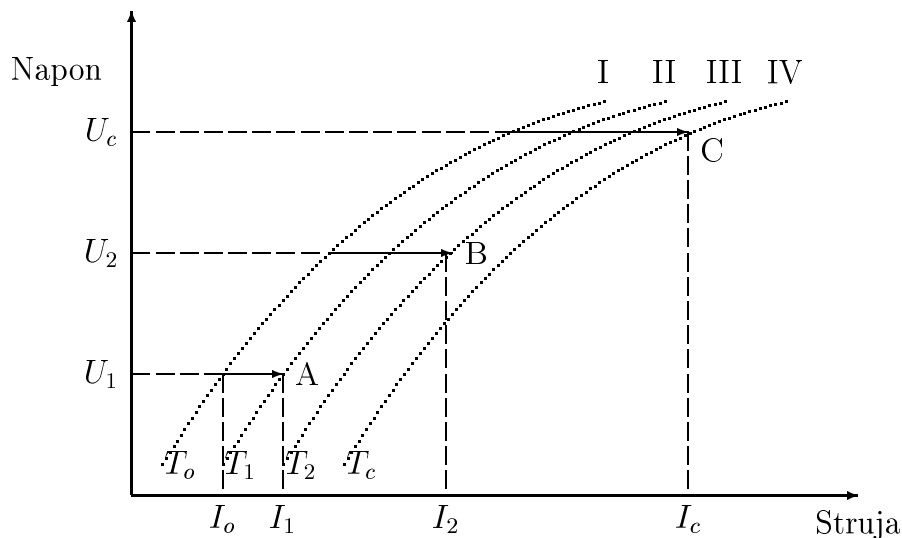
T_o –temperatura ambijenta ($^\circ C$).

U tački A na dijagramu 7.26 nalazi se režim stabilne toplotne ravnoteže. Sa malim porastom temperature bloka raste količina odate toplote brže od količine toplote koja se generiše u bloku i odvodnik se hladi. Naprotiv, u tački B se sa porastom temperature brže povećava količina toplote koja se oslobadja u bloku od količine toplote koja se odvodi u okolni ambijent, što znači da će blok nastaviti i dalje da se greje, pa nastaje **termički pobeg**.

Pri izboru odvodnika prenapona najvažniji parametar je **trajni radni napon**, jer je on trajno priključen izmedju krajeva odvodnika i izaziva trajno proticanje male struje kroz odvodnik, koji radi u linearnoj oblasti karakteristike preostalog napona. Bez obzira što

su struje usled trajnog radnog napona male, one izazivaju izvesno grejanje blokova, pa je neophodno da se oslobodjena količina toplote odvede sa blokova.

Na slici 7.27 objašnjen je proces narušavanja termičke stabilnosti pri normalnom radnom režimu. Kriva I na slici 7.27 predstavlja karakteristiku preostalog napona na temper-



Slika 7.27: Termička stabilnost blokova u normalnom radnom režimu

aturi ambijenta T_o . Kada se odvodnik priključi na napon U_1 , dolazi do proticanja struje I_o , koja izaziva grejanje blokova do temperature T_1 , što izaziva porast struje kroz odvodnik i pomeranje karakteristike preostalog napona. Za temperaturu blokova T_1 karakteristika preostalog napona predstavljena je krivom II . Posle uspostavljanja toplotnog stacionarnog stanja odvodnika režim se zadržava pri naponu U_1 u radnoj tački A sa temperaturom T_1 i strujom kroz odvodnik I_1 .

Ako se radni napon poveća na vrednost U_2 , dolazi do još intenzivnijeg grejanja blokova, koji u stacionarnom stanju dostižu temperaturu T_2 pri kojoj se karakteristika preostalog napona pomera na mesto krive III . Pri naponu U_2 posle uspostavljanja stacionarnog stanja struja kroz odvodnik je I_2 .

Ako bi se napon povećao do kritičnog napona U_c , u ustaljenom stanju bi se režim uspostavio na krivoj IV koja odgovara kritičnoj temperaturi blokova T_c . Dalje neznatno povećanje napona dovodi neminovno do **termičkog pobega odvodnika**.

Termički pobeg je pojava koja traje određeno vreme. To znači da ako u prelaznom režimu napon predje kritični napon U_c , počinje intenzivniji proces zagrevanja odvodnika

jer količina toplote koja se odvodi postaje manja od količine toplote koja se oslobadja na odvodniku. Međutim, ako dodje do smanjenja napona na trajno dozvoljenu vrednost, proces se vraća na prethodno stanje.

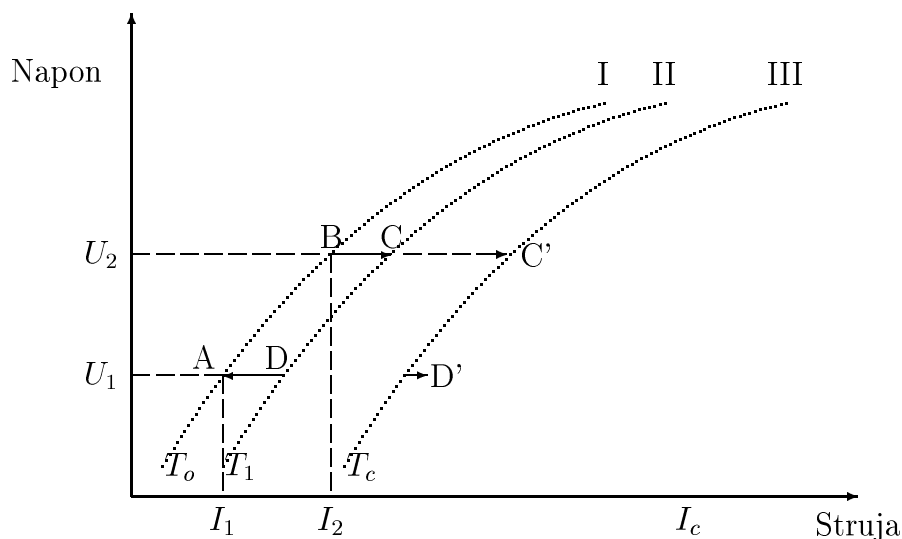
Zahvaljujući toplotnoj inerciji metal-oksidni odvodnici mogu da podnesu i privremene prenapone ograničenog trajanja. Pod **privremenim prenaponima** se podrazumevaju naponi veći od maksimalnog dozvoljenog radnog napona, industrijske učestanosti ili industrijske učestanosti sa superponiranim harmonicima više ili niže učestanosti, čije je trajanje ograničeno. Ovi prenaponi se još nazivaju **kvazistacionarnim**, povremenim, (engleski **temporary overvoltages**). Mogu nastati iz sledećih razloga:

1. Prenaponi pri zemljospojevima ili drugim kvarovima, posebno u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom,
2. Prenaponi pri naglom rasterećenju sistema,
3. Prenaponi pri rezonantnim pojavama (kada je sopstvena učestanost kola bliska industrijskoj).
4. Prenaponi usled ferorezonantnih pojava (rezonance u kolima sa izraženim nelinearnim karakteristikama magnećenja naponskih mernih ili energetske transformatora),
5. Prenaponi pri prekidu jedne ili dve faze (nepunofazni režimi).

Pored ovih, redje se mogu pojaviti privremeni prenaponi drugih uzroka.

Ovaj tip prenapona ima izuzetno važnu ulogu za izbor kako ZnO , tako i SiC odvodnika prenapona.

Podnošenje privremenih prenapona povezano je sa karakteristikom preostalog napona i može se objasniti na osnovu dijagrama na slici 7.28. Karakteristika preostalog napona I odgovara stacionarnoj radnoj temperaturi odvodnika T_1 koja odgovara trajnom radnom naponu odvodnika U_1 . Usled nastanka privremenog prenapona U_2 trenutno se režim iz radne tačke A sa strujom I_1 prebacuje u tačku B sa većom strujom I_2 . Zbog povećanja struje dolazi do postepenog porasta temperature odvodnika prenapona na T_2 , usled čega dolazi do pomeranja karakteristike preostalog napona u položaj II , sa daljim porastom struje. Ukoliko dodje do nestanka prenapona i vraćanja napona na stacionarnu vrednost U_1 , zbog toplotne inercije nakon nestanka privremenog prenapona blokovi bi bili još uvek zagrejani do temperature T_2 , tako da bi kroz njih proticala povećana struja (tačka D na dijagramu). Međutim, zbog manjeg oslobađanja toplote u blokovima došlo bi do hladjenja, pa bi se režim ponovo vratio na stacionarno stanje u tačku A sa strujom I_1 . Ukoliko bi pri povećanom naponu U_2 došlo do porasta temperature na kritičnu temperaturu T_c kojoj odgovara kriva III , tada dolazi do termičkog pobega.



Slika 7.28: Termička stabilnost blokova pri privremenim prenaponima

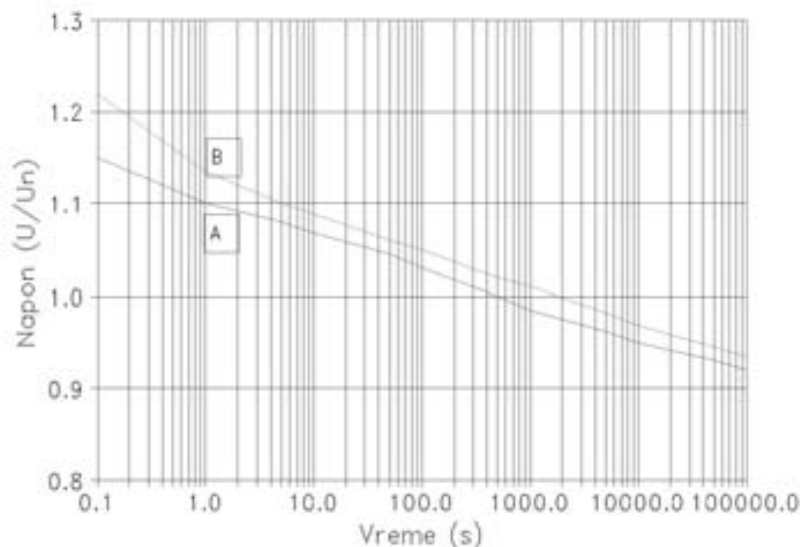
Sposobnost podnošenja privremenih prenapona industrijske učestanosti prikazuje se krivom efektivne vrednosti podnosivog privremenog prenapona u zavisnosti od trajanja (slika 7.29).

Na slici se oznaka A odnosi na odvodnik koji je prethodno bio opterećen sklopnim udarom, tako da se već nalazi u zagrejanom stanju. Kriva B se odnosi na odvodnik koji energetski nije bio prethodno napregnut, tako da on može nešto duže da izdrži povećani napon. Prilikom izbora odvodnika prenapona se proverava da li je odvodnik u stanju da podnese privremeni prenapon određenog trajanja koji se može pojaviti na posmatranom mestu.

7.3 Dodatna oprema odvodnika prenapona

Oba tipa odvodnika prenapona pored aktivnih elemenata (kod SiC odvodnika iskrišta i uredjaji za regulaciju napona duž odvodnika i kod oba tipa odvodnika blokovi nelinearnih otpornika) imaju i dodatnu opremu. U dodatnu opremu spadaju:

- Kućište za smeštaj odvodnika
- Sistem zaptivanja i opruga za postizanje kontaktnog pritiska
- Spoljašnje elektrode u obliku prstenova za poboljšanje raspodele napona kod odvodnika prenapona za visoke napone

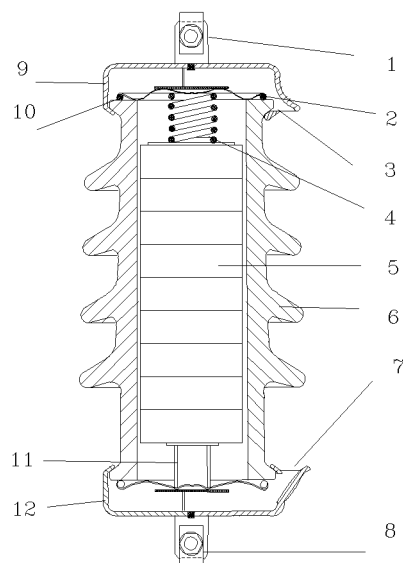


Slika 7.29: Sposobnost ZnO odvodnika da podnosi privremene prenapone A) Odvodnik prethodno napregnut maksimalnim sklopnim prenaponom, B) Odvodnik koji prethodno nije bio napregnut sklopnim prenaponom

- Sigurnosna membrana nadpritiska unutar kućišta
- Pribor za spajanje sa faznim provodnikom i uzemljenjem
- Brojač pražnjenja (ovo nije obavezan deo odvodnika)

Na slici 7.30 prikazan je kompletan sklop ZnO odvodnika prenapona u preseku. Oznake na slici 7.30 imaju sledeće značenje:

1. –Gornja stezaljka za vezu sa faznim provodnikom
2. –Sigurnosna membrana
3. –Otvor za ispuštanje vrelih gasova u slučaju pojave električnog luka
4. –Opruga za postizanje kontaktnog pritiska izmedju blokova otpornika i provodnih delova
5. –Nelinearni otpornici od ZnO
6. –Porculansko kućište
7. –Otvor za ispuštanje vrelih gasova u slučaju pojave električnog luka
8. –Donja stezaljka za vezu sa uzemljenjem



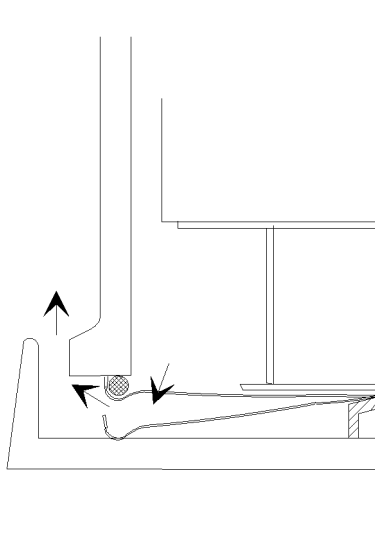
Slika 7.30: Presek kompletnog srednjenaponskog odvodnika prenapona

- 9. –Gornja kapa
- 10. –Zaptivka izmedju membrane i kućišta
- 11. –Distantni cilindar od provodnog materijala
- 12. –Donja kapa

7.3.1 Sigurnosna membrana

U slučaju prodora vlage unutar kućišta i kondenzacije vlage po zidovima, pojavljuju se male struje kroz tanke provodne opne od vlage. Ove struje ne oštećuju odvodnik. Međutim, ukoliko dodje do pojave isušivanja opne od vlage, na tom mestu se pojavljuje delimični preskok, koji izaziva pojavu iskrenja. Ukoliko je otpor iskre manji od otpora ostalog dela provodne staze, postojaće tendencija da se luk produžava, sve dok ne dovede do kratkog spoja nelinearnih otpornika, uz pojavu vrlo velike struje kratkog spoja, koja može zbog porasta pritiska da izazove eksploziju odvodnika. Da bi se to sprečilo, ugrađena je membrana koja ima za zadatak da u slučaju pojave nadpritiska u kućištu ispusti višak gasova kroz za to predviđen otvor. Vreli gasovi ispušteni kroz gornji i donji otvor odvodnika obrazuju luk sa spoljašnje strane odvodnika, koji je bezopasan.

Na slici 7.31 prikazana je detaljno konstrukcija zaštitne membrane natpritiska. Sa



Slika 7.31: Presek sigurnosne membrane

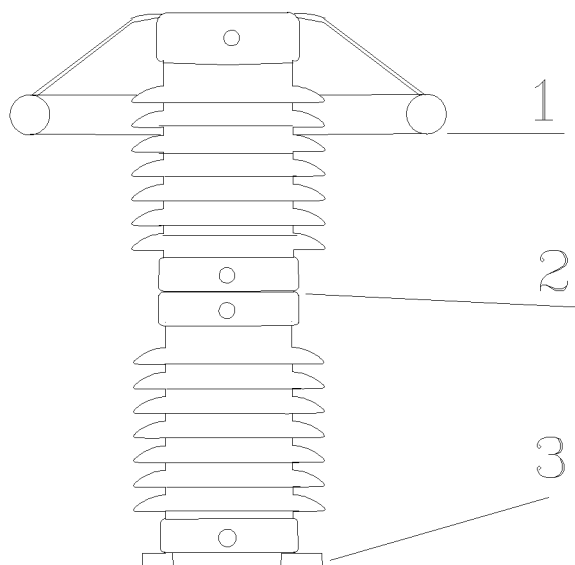
slike se može uočiti da se u slučaju pojave natpritiska unutar kućišta elastična membrana deformiše oslobadajući prostor između zaptivnog prstena i odgovarajućeg ležišta na membrani. Vreli gasovi struje van kućišta kao što to pokazuju strelice.

7.3.2 Prsten za raspodelu potencijala

Kod odvodnika prenapona za visoke napone kućište odvodnika ima veliku dužinu, što smanjuje uticaj podužnih kapaciteta odvodnika i povećava nelinearnost raspodele napona po blokovima kod ZnO odvodnika, odnosno po iskrištima kod SiC odvodnika. Jedan od načina da se raspodela napona učini ravnomernijom je da se naprave elektrode za regulaciju raspodele napona sa spoljašnje strane odvodnika prenapona. Tipičan oblik odvodnika prenapona sa elektrodama prikazan je na slici 7.32. Elektroda je uradjena u vidu prstena koji je na faznom naponu, kao što je i gornja kapa odvodnika prenapona.

Oznake na slici imaju sledeće značenje:

1. Presek prstena za raspodelu potencijala
2. Spoj donje kape gornje jedinice i gornje kape donje jedinice odvodnika prenapona
3. Podnožje pomoću koga se odvodnik prenapona pričvršćuje na odgovarajući nosač



Slika 7.32: Odvodnik prenapona sa elektrodom za raspodelu napona

Može se uočiti da je odvodnik sastavljen od dve redno vezane jedinice, od kojih samo gornja ima prsten za regulaciju raspodele napona. Ovakvom konstrukcijom se može postići tipizacija elemenata odvodnika, tako da se potpuno istom konstrukcijom mogu formirati odvodnici za različite naznačene napone, jednostavnim slaganjem elemenata na red.

Skica na slici 7.32 ne odgovara realnim dimenzijama, jer je odvodnik nacrtan skraćene dužine.

7.3.3 Brojač pražnjenja

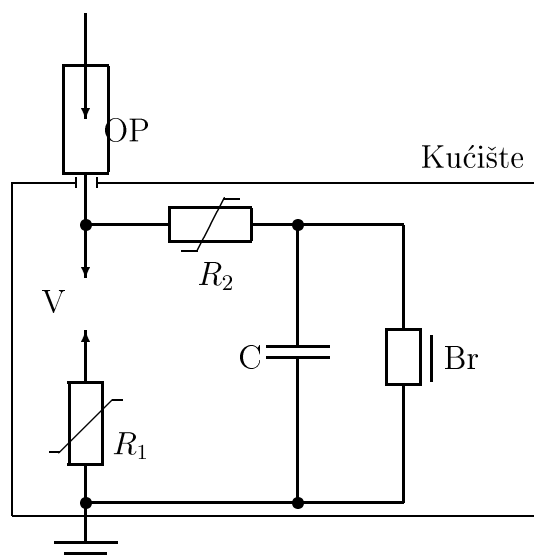
Brojač pražnjenja je uređaj koji se vezuje izmedju odvodnika prenapona i uzemljenja, sa ciljem da registruje svako provodjenje udarne struje kroz odvodnik.

Brojač pražnjenja ne mora da se ugradjuje, mada je njegova primena korisna iz dva razloga:

- Može se na osnovu očitavanja stanja brojača zaključiti koliko je štice na mreži izložena prenaponima
- Važna je informacija i o tome koliko je puta odvodnik prenapona bio napregnut odvođenjem struje, radi njegovog eventualnog slanja na preventivna ispitivanja karakteris-

tika.

Ekvivalentna šema brojača pražnjenja prikazana je na slici 7.33. Oznake na slici imaju



Slika 7.33: Šema brojača pražnjenja odvodnika prenapona

sledeće značenje:

OP –Odvodnik prenapona

V –Varničar (iskrište)

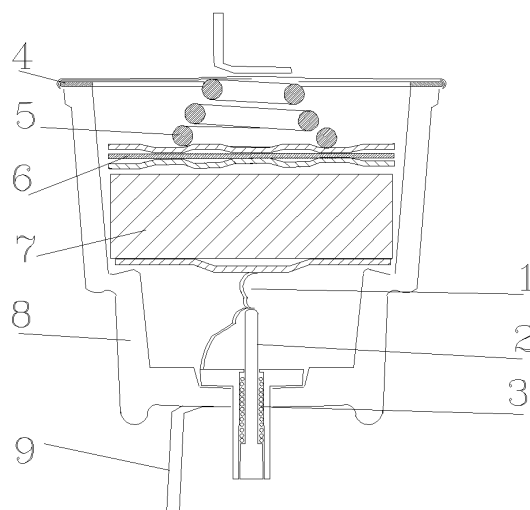
R_1 –Nelinearni otpornik

R_2 –Nelinearni otpornik

Br –Mehanički brojač

C –Kondenzator

Brojač pražnjenja radi na sledećem principu: kada odvodnik prenapona OP reaguje, kondenzator C se puni preko nelinearnog otpornika R_2 do napona dovoljnog da varničar V reaguje. Tada napon na varničaru opada, struja se vodi preko nelinearnog otpornika R_1 koji treba da provede kompletnu struju pražnjenja u zemlju. Nelinearni otpornik R_2 povećava vrednost, pa se kondenzator C prazni preko mehaničkog brojača koji pomera svoj cifarnik na sledeću brojku.



Slika 7.34: Niskonaponski odvodnik sa mrežnim odvajačem

7.3.4 Uredjaj za odvajanje odvodnika

Uredjaj za odvajanje odvodnika ili mrežni odvajač je uredjaj koji se postavlja na odvodnik prenapona sa ciljem da ga odvoji od mreže u slučaju otkaza odvodnika radi sprečavanja njegovog trajnog kvara, kao i da vidno označi odvodnik u kvaru. Ovaj uredjaj radi na sličnom principu kao topljivi osigurač, odvajajući odvodnik od mreže i obezbeđujući gašenje luka u trenutku odvajanja.

Mrežni odvajači imaju pozitivne i negativne osobine:

- Pozitivna osobina mrežnog odvajača je što štiti odvodnik od razaranja i sprečava moguću eksploziju kućišta.
- Negativna osobina je što odvodnik prenapona koji je odvojen od mreže više nema nikakvu ulogu dok se ne zameni (što zahteva nadzor nad odvodnicima da bi se uočilo koji je odvodnik odvojen od mreže).

Mrežni odvajači se koriste uglavnom kod odvodnika za niže nazivne napone. Konstrukcija niskonaponskog odvodnika sa mrežnim odvajačem prikazana je na slici 7.34.

Oznake na slici 7.34 imaju sledeće značenje:

1. Specijalna osigurač žica

2. Igla koja se oslobadja pregorevanjem osigurač žice
3. Opruga koja izbacuje iglu
4. Zaptivač
5. Opruga koja ostvaruje kontakti pritisak
6. Iskrište
7. Nelinearni blok
8. Kućište
9. Donji priključak

Osigurač žica mora da izgori pri velikim strujama koje duže traju od propisane (na primer 15 kA duže od 100 μs) ili ako se luk ne može ugastiti za vreme kraće od 20 ms .

7.4 Izbor odvodnika prenapona

7.4.1 Izbor SiC odvodnika prenapona

Izbor odvodnika prenapona se vrši postupkom koji se može podeliti u nekoliko koraka.

- **Odredjivanje trajnog radnog napona odvodnika.** Ovaj napon može da bude niži od naznačenog napona odvodnika.
 1. U slučaju da odvodnik radi u mreži sa izolovanom neutralnom tačkom ili neutralnom tačkom uzemljenom preko Petersenove prigušnice (rezonantno uzemljenje neutralne tačke), bez automatskog isključenja kvara, trajan radni napon se bira da je jednak ili viši od maksimalnog faznog napona za vreme trajanja zemljospoja.
 2. U mrežama sa automatskim isključivanjem zemljospoja trajan radni napon odvodnika se bira da je jednak ili viši maksimalnom faznom radnom naponu sistema.
- **Izbor naznačenog napona odvodnika.** Naznačeni napon odvodnika mora biti jednak ili viši od maksimalnog privremenog prenapona. Praksa je da se maksimalni privremeni prenapon bira kao napon neoštećenog faznog provodnika prema zemlji za vreme trajanja zemljospoja. Međutim, pri izboru odvodnika treba uzeti u obzir i mogućnost

istovremenog nastanka privremenih prenapona iz dva razloga, kao na primer istovremeni nastanak naglog rasterećenja i zemljospoja. Privremeni prenaponi mogu nastati iz više razloga, od kojih su najvažniji:

1. Zemljospoj u mreži,
2. Naglo rasterećenje izvora,
3. Isključenje kvara,
4. Porast napona na otvorenom kraju dugog voda (Ferantijev efekat),
5. Linearni i nelinearni rezonantni efekti kao što su ferorezonantni prenaponi.

Prilikom izbora odvodnika je potrebno izabrati naznačeni napon koji je jednak ili viši od onoga koji se dobija na neoštećenom faznom provodniku za vreme zemljospoja. Odnos između napona na neoštećenom faznom provodniku prema zemlji na mestu ugradnje odvodnika i napona prema zemlji u normalnom radnom režimu na istom mestu naziva se faktorom zemljospoja. Privremeni prenapon pri zemljospoju na osnovu koga se bira naznačeni napon odvodnika prenapona dobija se kada se maksimalni radni fazni napon pomnoži sa faktorom zemljospoja. Faktor zemljospoja zavisi pre svega od načina uzemljenja neutralne tačke, ali zavisi i od parametara mreže (posebno od odnosa nulte i direktne reaktanse sistema X_o/X_d). Kod mreža sa izolovanom neutralnom tačkom faktor prenapona je najčešće 1,73, mada može da bude i veći za negativan odnos X_o/X_d . Kod mreža sa efikasno uzemljenom tačkom faktor zemljospoja iznosi najviše do 1,4.

- **Procena amplitude očekivane struje pražnjenja kroz odvodnik.** Očekivana struja kroz odvodnik zavisi od sledećih faktora:

1. Složenosti postrojenja i naznačenog napona sistema,
2. Da li su prilazni vodovi snabdeveni zaštitnim užadima,
3. Ukoliko su prilazni vodovi samo ispred postrojenja snabdeveni zaštitnim užadima, dužina zaštićene zone ispred postrojenja,
4. Udarne impedanse uzemljenja prilaznih stubova,
5. Broja priključenih vodova na sabirnice postrojenja,
6. Podnosivog napona izolacije prilaznih vodova. U slučaju drvenih stubova se može očekivati značajno povećanje struje kroz odvodnik u odnosu na metalne ili armirano-betonske stubove ukoliko se ne uzemlji konzola prvog stuba ispred postrojenja.

Na osnovu očekivane struje pražnjenja se bira **klasa odvodnika**. Prema IEC preporukama se biraju odvodnici **klase 10 kA** u sledećim slučajevima:

- Kod važnih postrojenja,

- Područja sa izraženom grmljavinskom aktivnošću (na primer za područja sa kerauničkim nivoom iznad 15),
- U slučaju kada su prilazni vodovi ka postrojenju neefikasno zaštićeni,
- Ukoliko otpornost uzemljenja stubova prelazi $10\ \Omega$ unutar rastojanja od $1\ km$ ispred postrojenja, zbog opasnosti od povratnog preskoka,
- Korišćenje drvenih stubova bez uzemljenih konzola na prilaznim vodovima,
- Ako je broj priključenih vodova na sabirnicama manji od 3.

Odvodnici nazivne struje odvodjenja od $5\ kA$ se koriste u sledećim slučajevima:

- zaštita distributivnih transformatora manje važnosti,
- područja sa slabom grmljavinskom aktivnošću (keraunički nivo ispod 15),
- efikasno zaštićeni prilazni vodovi zaštitnim užadima,
- kada su otpornosti uzemljenja stubova ispod $10\ \Omega$.

Za sisteme nazivnog napona ispod $1000\ V$ mogu se koristiti odvodnici nazivne struje odvodjenja od $2, 5\ kA$.

- **Struja rasterećenja dugih vodova.** Ukoliko se očekuje mogućnost proticanja struje rasterećenja dugačkih vodova, kablova ili kondenzatorskih baterija, primenjuju se odvodnici prenapona klase $10\ kA$ za teške uslove rada, koji su sposobni da podnesu dugotrajnu struju rasterećenja voda. Po pravilu se u visokonaponskim mrežama (naznačenog napona iznad $300\ kV$) primenjuju ovi odvodnici prenapona. U mrežama nižih naponskih nivoa se odvodnici za teške uslove rada primenjuju u postrojenjima velike važnosti, ili kada su dugački vodovi ili kablovi priključeni na sabirnice. U ostalim slučajevima se primenjuju $10\ kA$ odvodnici za lake uslove rada ili $5\ kA$ odvodnici.
- **Klasa zaštite od nadpritiska.** U slučaju unutrašnjeg kvara odvodnika kroz odvodnik će proticati struja kratkog spoja. Ova struja mora delovati na sigurnosnu membranu da spreči eksplozivno razaranje odvodnika. Podnosiva struja kratkog spoja odvodnika mora da bude veća ili jednaka od odgovarajuće struje kvara koja se može pojaviti na mestu ugradnje odvodnika.
- **Zahtevi vezani za aero-zagadjenje područja na kome se odvodnik ugrađuje,**
- **Procena potrebe da odvodnik ograničava sklopne prenapone.** Po pravilu odvodnici za mreže iznad $300\ kV$ se rade tako da ograničavaju sklopne prenapone. Odvodnici u mrežama nižih napona treba da štite od sklopnih prenapona, ako imaju posebnu namenu kao na primer zaštita neutralne tačke.
- **Specijalni zahtevi.** Ako se očekuju specifični uslovi primene odvodnika, tada se pred odvodnike postavljaju posebni zahtevi, kao na primer:

- Odvodnici za područja sa vrlo velikim zagađjenjem koji se mogu prati pod naponom,
- Odvodnici za područja sa vrlo jakim vetrovima,
- Odvodnici prenapona otporni na zemljotrese,
- Ograničenje u sigurnosnim razmacima prema provodnim površinama.

Kada je odvodnik izabran, tada se proverava ugroženost štićenog objekta.

7.4.2 Izbor ZnO odvodnika prenapona

Izbor ZnO odvodnika prenapona prema [90] se vrši u tri koraka:

1. Odredjivanje parametara sistema
2. Provera nenormalnih uslova rada
3. Izbor naznačenog napona

Odredjivanje parametara sistema

Najvažniji parametar sistema je **maksimalni dozvoljeni radni napon** U_m , koji je obično 5 – 10 % viši od naznačenog napona sistema. Ovaj napon predstavlja efektivnu linijsku vrednost napona.

Drugi važan faktor je visina i trajanje privremenog prenapona U_t . Privremeni prenaponi se najčešće odredjuju kao prenapon na neoštećenom faznom provodniku pri zemljospoju u mreži. Dok kod izbora SiC odvodnika prenapona nije bilo od važnosti trajanje privremenog prenapona, u ovom slučaju je to od izuzetne važnosti. Ako se ne raspolaže tačnim podacima o podešenosti zaštite, prema IEC preporukama se usvaja da je trajanje zemljospoja u prenosnoj mreži do 3 s i u distributivnoj mreži do 10 s za sisteme sa uzemljenom neutralnom tačkom. Ako sistem radi sa izolovanom neutralnom tačkom, tada trajanje zemljospoja može biti od nekoliko sekundi do nekoliko dana.

Provera nenormalnih uslova rada

Ponekad se mogu u sistemu pojaviti okolnosti pri kojima se u uzemljenom sistemu na nekim mestima mogu pojaviti viši naponi na neoštećenim faznim provodnicima od očekivanih (na

primer pri razemljivanju neutralnih tačaka pojedinih transformatora koji rade paralelno), što čini ovaj sistem neefikasno uzemljenim.

Ako postoje uslovi za istovremeni nastanak i privremenih prenapona usled zemljospoja i ispada opterećenja, tada takav slučaj treba uzeti u obzir.

Izbor naznačenog napona odvodnika

Naznačeni napon odvodnika se određuje na dva načina:

1. Na osnovu trajnog radnog napona U_c koji je jednak faznoj vrednosti maksimalnog dozvoljenog radnog napona U_m , odnosno: $U_c = U_m / \sqrt{3}$
2. Na osnovu privremenog prenapona pri zemljospoju $U_t = K_f \cdot U_c$, gde je K_f faktor zemljospoja, koji se usvaja za direktno uzemljene sisteme da iznosi maksimalno 1,4, a za izolovane sisteme 1,73.

Naznačeni napon na bazi trajnog radnog napona određuje se iz izraza:

$$U_{R_o} = \frac{U_c}{K_o} \quad (7.11)$$

gde su:

K_o —faktor izrade koji daje proizvođač. Za odvodnike koje proizvodi ASEA faktor izrade je $K_o = 0,8$.

U_{R_o} —naznačeni napon odvodnika određen na bazi trajnog radnog napona.

Naznačeni napon na bazi privremenog prenapona se određuje iz izraza:

$$U_{R_t} = \frac{U_t}{K_t} \quad (7.12)$$

gde je:

K_t —koeficijent koji uvažava sposobnost odvodnika da podnosi privremene prenapone. Ovaj koeficijent zavisi od privremenog prenapona koga odvodnik može određeno vreme da podnese i predstavlja multipl naznačenog napona odvodnika (ovaj koeficijent se izražava u relativnim jedinicama u odnosu na naznačeni napon odvodnika). Koeficijent

K_t se daje grafički u funkciji trajanja privremenog prenapona. Neki proizvođači (na primer domaći proizvođač Minel) definišu K_t kao multipl maksimalnog dozvoljenog napona sistema U_c . U tom slučaju se dobija na bazi privremenog prenapona U_t trajno dozvoljeni radni napon U_{ct} iz izraza:

$$U_{ct} = \frac{U_t}{K_t} \quad (7.13)$$

Iz kataloga se za dobijeno U_{ct} određeno na bazi privremenog prenapona određuje naznačeni napon odvodnika U_{Rt} .

Ukoliko postoje i drugi privremeni prenaponi, mogu se odrediti i drugi naznačeni naponi odvodnika u odnosu na te prenapone.

Finalni izbor odvodnika vrši se na bazi najvišeg naznačenog napona odvodnika između U_{Ro} i U_{Rt} .

7.4.3 Primer izbora ZnO odvodnika prenapona

Na ovom mestu će biti ilustrovan postupak izbora ZnO odvodnika prenapona u mreži nazivnog napona 400 kV. Izbor će se vršiti iz kataloga domaćeg proizvođača odvodnika MINEL.

ZnO odvodnik prenapona se bira prema preporučenoj proceduri od strane proizvođača odvodnika ABB, a koja je usvojena i u našoj inženjerskoj praksi.

7.4.4 Odredjivanje parametara sistema

Najviši napon mreže U_m

Maksimalni dozvoljeni radni napon je $U_m = 420 \text{ kV}$.

Privremeni prenapon

Privremeni prenapon se računa u odnosu na zemljospoj. U slučaju direktno uzemljenog sistema se smatra da napon neoštećenih faznih provodnika ne raste iznad $K_f = 1,4$ u odnosu na fazni napon.

Trajanje zemljospoja $t=0,5$ s

7.4.5 Izbor naznačenog napona odvodnika

Trajni radni napon odvodnika U_c

Trajni radni napon je $U_c = 420/\sqrt{3} = 242,5$ kV

Preliminarni naznačeni napon odvodnika u odnosu na U_c

Preliminarni naznačeni napon odvodnika u odnosu na U_c je:

$$U_{Ro} = U_c / K_o \quad (7.14)$$

gde je $K_o = 0,8$ za odvodnike prenapona pojedinih proizvođača (ASEA, MINEL).

$$U_{Ro} = 242,5 / 0,8 = 303$$
 kV (7.15)

Privremeni prenapon kod zemljospoja iznosi:

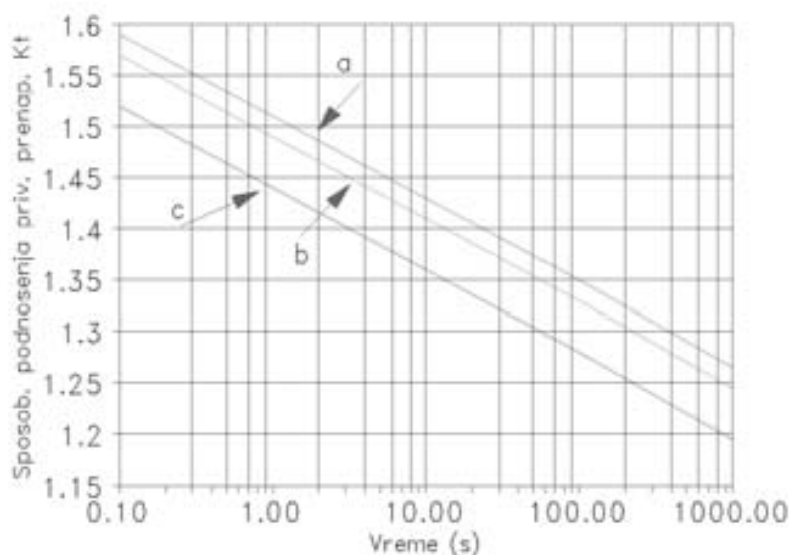
$$U_{tz} = 1,05 \cdot K_Z \cdot U_{tr} = 1,05 \cdot 1,4 \cdot 420/\sqrt{3} = 356,5$$
 kV (7.16)

Faktor 1,05 se usvaja za visokonaponske mreže zbog uticaja raznih faktora koji mogu da izazovu netačnost procenjenog privremenog prenapona.

Na slici 7.35 prikazana je zavisnost **sposobnosti podnošenja privremenih prenapona** pri temperaturi ambijenta od 45°C , koja je preuzeta iz kataloga MINEL-a. Ova veličina je data u relativnim jedinicama u odnosu na trajno dozvoljeni radni napon U_c .

Treba voditi računa da neki drugi proizvođači (na primer ABB) daju zavisnost sposobnosti podnošenja privremenih prenapona K_t u relativnim jedinicama u odnosu na naznačeni napon odvodnika, koji je 25 % viši od trajnog radnog napona.

Iz kataloga se dobija da je za trajanje kvara od 0,5 s odnos privremenog prenapona usled zemljospoja i trajnog radnog napona odvodnika $K_t = U_{tz}/U_c = 1,47$ uz prethodno opterećenje od 8 kJ/kV računato u odnosu na trajni radni napon.



Slika 7.35: Sposobnost podnošenja privremenih prenapona K_t pri temperaturi ambijenta od 45°C . a) Bez prethodnog opterećenja, b) prethodno opterećen odvodnik sa 4 kJ/kV, c) prethodno opterećen odvodnik sa 8 kJ/kV

Preliminarni naznačeni napon baziran na prenaponu pri zemljospoju

Na osnovu gornjeg odnosa se može svesti privremeni prenapon na trajni radni napon, odnosno:

$$U_c = \frac{U_{tz}}{K_t} \quad (7.17)$$

odnosno:

$$U_c = \frac{356,5}{1,47} = 242,5 \quad (7.18)$$

Iz kataloga se bira prva veća vrednost trajnog radnog napona: $U_c = 253 \text{ kV}$, odnosno naznačeni napon $U_R = 312 \text{ kV}$.

Ukoliko bi se izbor radio prema katalogu proizvođača kod koga je K_t dato u relativnim jedinicama u odnosu na naznačeni napon, tada bi se direktnim deljenjem privremenog prenapona U_t sa faktorom K_t dobio naznačeni napon odvodnika.

Izabrani odvodnik, ako je prethodno opterećen sa 8 kJ po kV od trajno dozvoljenog radnog napona kratkotrajno izdržava (0,5 s) privremeni prenapon:

$$U_{tz} = U_c \cdot K_t = 253 \cdot 1,47 = 372 \text{ kV fazno} \quad (7.19)$$

7.5 Ispitivanje SiC odvodnika prenapona

Odvodnici prenapona su uređaji koji veoma retko obavljaju svoju funkciju, ali moraju da budu uvek spremni da je uspešno urade. U trenutku obavljanja funkcije oni su izloženi veoma velikom naprezanju zbog proticanja struje velikog intenziteta kroz njih. Propisima su predviđena određena ispitivanja koja odvodnik mora uspešno da prođe da bi sigurno u pogonu izdržao naprezanja kojima može biti izložen, a sa druge strane da bi se proverile njegove zaštitne karakteristike. Ova ispitivanja se mogu podeliti na sledeća tri tipa:

- tipska ispitivanja (ispitivanja koja se obavljaju po završetku razvoja nove konstrukcije u cilju provere karakteristika),
- komadna ispitivanja (ispitivanja koja se vrše na svakom odvodniku, njegovom delu ili uzorcima materijala od koga je napravljen, u cilju provere da li proizvod odgovara zahtevima),
- prijemna ispitivanja (ispitivanja koja se rade na određenom broju uzoraka neke isporuke, u skladu sa dogovorom proizvođača i kupca).

7.5.1 Tipska ispitivanja

Prema preporukama Medjunarodne elektrotehničke komisije (IEC) [91] u tipska ispitivanja spadaju:

- određivanje naizmeničnog napona reagovanja industrijske frekvencije,
- određivanje napona reagovanja standardnim atmosferskim udarnim talasom,
- određivanje volt-sekundne karakteristike (zavisnost napona do reagovanja od strmine čela udarnog talasa),
- određivanje udarnog napona reagovanja na čelu talasa,
- određivanje preostalog napona,
- ispitivanje podnosivom udarnom strujom,
- ispitivanje u radnim uslovima,
- ispitivanje uređaja za ograničavanje pritiska (ako je odvodnik snabdeven ovim uređajem),

- ispitivanje uređaja za odvajanje odvodnika.

Pojedina ispitivanja se mogu raditi na delovima odvodnika, a poneka se moraju raditi na kompletnim odvodnicima. U pogledu uzorka koji se ispituje može se izvršiti sledeća podela:

1. Pod **kompletnim odvodnikom** se podrazumeva odvodnik koji je kompletno opremljen i pripremljen za ugradnju.
2. Pod **jedinicom odvodnika** se podrazumeva kompletan deo odvodnika u kućištu, koji se u pogonu vezuje na red sa drugim jedinicama u cilju formiranja kompletnog odvodnika za viši naznačeni napon.
3. Pod **sekcijom odvodnika** se podrazumeva deo odvodnika koji ima odgovarajući broj nelinearnih otpornika i iskrišta vezanih na red. Ovi elementi su na pogodan način smešteni u kućište i predstavljaju u određenoj proporciji ponašanje kompletnog odvodnika. Ispitivanja na sekcijama rade se srazmerno nižim naponima, a koeficijent srazmere je odnos broja redno vezanih nelinearnih otpornika i iskrišta u sekciji prema njihovom ukupnom broju u kompletnom odvodniku.

Sva ispitivanja se mogu podeliti na naponska i strujna ispitivanja. U naponska ispitivanja spadaju određivanje napona reagovanja odvodnika pri različitim oblicima i amplitudama ispitnih napona. U strujna ispitivanja spadaju određivanje preostalog napona pri različitim oblicima udarnih struja, ispitivanje podnosivim udarnim strujama, ispitivanje u radnim uslovima, kao i ispitivanje uređaja za ograničenje pritiska i uređaja za odvajanje.

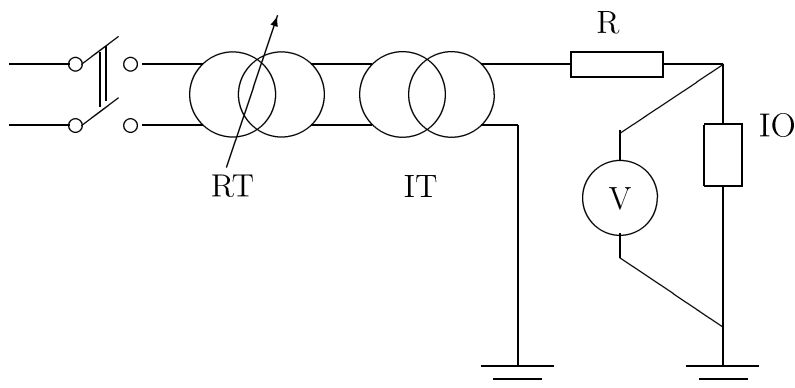
7.5.2 Naizmenični napon reagovanja industrijske frekvencije

Odvodnik prenapona u normalnim uslovima nikada ne sme da reaguje na napon industrijske frekvencije, jer to sigurno dovodi do njegovog termičkog uništenja. Zbog toga se zahteva da napon reagovanja na napon industrijske frekvencije bude bar 1,5 puta viši od naznačenog napona odvodnika.

Tipičan oblik kola za dobijanje ispitnog napona industrijske frekvencije prikazan je na slici 7.36. Oznake na slici 7.36 imaju sledeće značenje:

RT–Regulacioni transformator za podešavanje ispitnog napona,

IT–Ispitni transformator,



Slika 7.36: Ispitno kolo za ispitivanje naizmeničnim naponom

R–Zaštitni otpornik za ograničenje struje pri razornom pražnjenju na objektu ispitivanja (u ispitnim šemama sa ispitnim transformatorom čija je reaktansa rasipanja dovoljno velika zaštitni otpornik može biti izostavljen),

IO–Ispitivani objekat (odvodnik prenapona),

V–Uredjaj za merenje visokog napona.

Ispitivanja se rade na 3 uzorka kompletnih odvodnika. Oni moraju biti čisti, kompletno opremljeni (sa prstenovima za raspodelu potencijala) u uslovima koji su što bliži realnim. Napon se mora podizati ravnomerno, ali dovoljno brzo ako odvodnik ima elemente za upravljanje raspodelom potencijala koji su napravljeni od nelinearnog otpornog materijala, da oni ne bi bili termički preopterećeni. Dozvoljeno je vreme premašenja naznačenog napona kod ovog tipa odvodnika samo u intervalu 2 do 5 s. Posle reagovanja ispitni napon treba isključiti za najviše 0,5 s, po mogućstvu automatskim okidačem.

Ispitna frekvencija mora biti u granicama $48 - 62 \text{ Hz}$, a napon sinusnog oblika sa minimalnim sadržajem viših harmonika.

Ukoliko odvodnik ima nelinearne otpornike za upravljanje raspodelom potencijala, ispitno kolo mora imati dovoljnu snagu da se spreči pojava viših harmonika.

Ispitivanje treba vršiti bar 5 puta sa razmakom između dva ispitivanja od 10 s. Napon reagovanja se određuje kao srednja vrednost od 5 merenja. Pod naponom reagovanja odvodnika se podrazumeva temena vrednost napona podeljena sa $\sqrt{2}$.

Ispitivanje naizmeničnim naponom industrijske učestanosti može biti:

1. Ispitivanje na suvom
2. Ispitivanja pri kiši

Ispitivanje na kiši se radi samo na odvodnicima za spoljnu montažu. Odvodnik mora da se podvrgne veštačkoj kiši 1 min pre primene napona. Kiša treba da pada pod uglom od 45° sa intenzitetom od $3\text{mm}/\text{min} \pm 10\%$. Otpornost vode treba da bude $10000\Omega\text{cm} \pm 10\%$, prema zahtevima IEC standarda za visokonaponska ispitivanja [92].

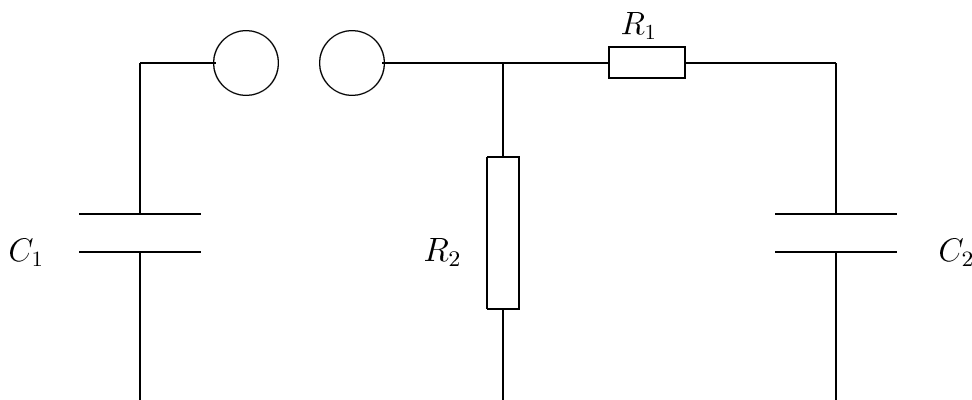
7.5.3 Odredjivanje napona reagovanja standardnim atmosferskim udarnim naponom

Ispitivanja se rade na istim uzorcima koji su bili ispitivani naizmeničnim naponom industrijske učestanosti. Ispitivanje se radi standardnim atmosferskim talasom oblika 1,2/50. Standardi propisuju maksimalnu vrednost standardnog atmosferskog udarnog napona u zavisnosti od naznačenog napona odvodnika, prema tabeli 7.4:

naznačeni napon odvodnika $U_f (kV_{eff})$	Maksimalni standardni atmosferski udarni napon reagovanja ($k\hat{V}$)	
	10 kA odvodnici za teške uslove rada	$\leq 10\text{ kA}$ odvodnici za lake uslove rada
$0,15 < U_f \leq 0,3$	-	$8,00 U_f$
$0,3 < U_f \leq 0,6$	-	$6,00 U_f$
$0,6 < U_f \leq 1,2$	-	$5,00 U_f$
$1,2 < U_f \leq 10$	-	$3,60 U_f$
$10 < U_f \leq 120$	$2,8 U_f$	$3,33 U_f$
$120 < U_f \leq 200$	$2,6 U_f$	$3,00 U_f$
$200 < U_f \leq 300$	$2,6 U_f$	-
$300 < U_f \leq 420$	$2,5 U_f$	-
$U_f > 420$	$2,5 U_f$	-

Tabela 7.4: Vrednosti maksimalnih udarnih napona reagovanja u odnosu na naznačeni napon U_f

Najjednostavnija ekvivalentna šema ispitnog kola za dobijanje udarnih naponskih talasa prikazana je na slici 7.37. Na ekvivalentnoj šemi na slici 7.37 kondenzator C_1 se puni visokim jednosmernim naponom U_o iz posebnog izvora visokog jednosmernog napona.



Slika 7.37: Opšti oblik ekvivalentne šeme za dobijanje udarnih naponskih talasa

Posle reagovanja iskrišta kondenzator C_2 se velikom brzinom puni preko otpornika male otpornosti R_1 , koji se naziva otpornikom čela talasa. Približna vrednost vremenske konstante opterećivanja kondenzatora C_2 je:

$$T_1 \approx \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} R_1 \quad (7.20)$$

Kondenzator C_2 , koji u sebi sadrži i kapacitivnost ispitnog objekta, uvek je znatno manji od kondenzatora C_1 , pa je i vremenska konstanta T_1 vrlo mala. Kada se kondenzator C_2 napunio, tada se kondenzatori C_1 i C_2 rasterećuju zajedno preko otpornika R_2 velike otpornosti. Vremenska konstanta rasterećenja oba kondenzatora data je sledećim približnim izrazom:

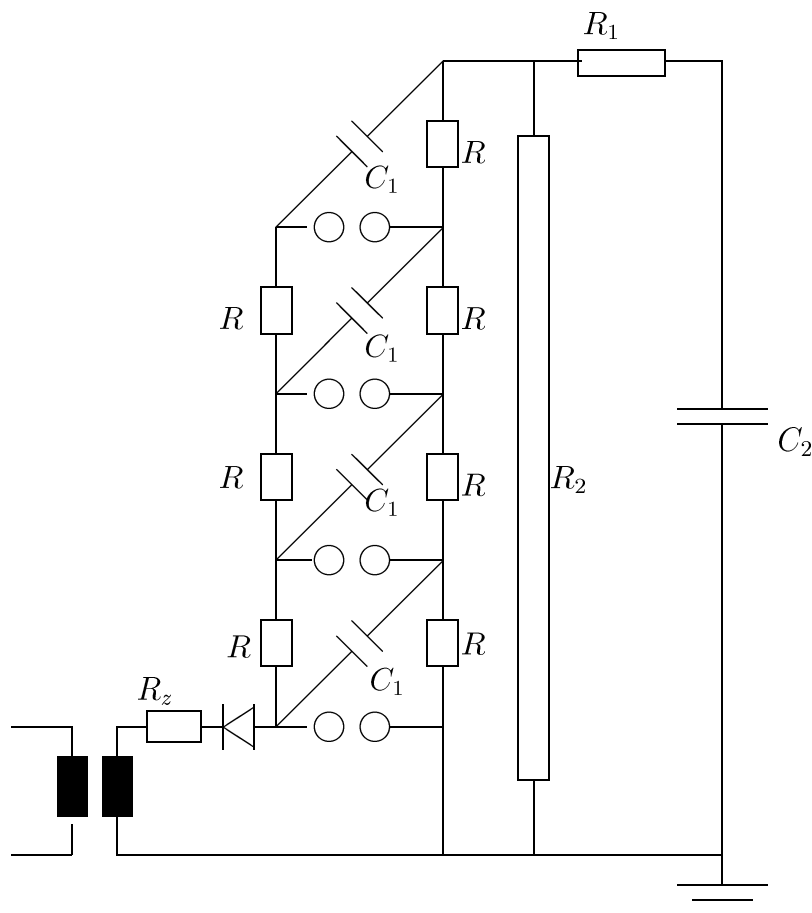
$$T_2 \approx (C_1 + C_2) R_1 \quad (7.21)$$

U gornjem razmatranju je pri procesu opterećivanja kondenzatora C_2 preko otpornika R_1 , kada se formira čelo talasa, zanemaren uticaj rasterećivanja kondenzatora preko otpornika R_2 .

Za uspešan rad naponskog udarnog generatora treba da budu ispunjeni uslovi da je $C_1 \gg C_2$ i $R_1 \ll R_2$. U tom slučaju će i vremenska konstanta čela biti mnogo manja od vremenske konstante začelja.

Za dobijanje vrlo visokih udarnih napona koristi se veći broj kaskada od kondenzatora, otpornika i iskrišta, koji čine višestepeni udarni generator, kao na slici 7.38.

U šemi na slici 7.38 svi kondenzatori C_1 se opterećuju u paralelnoj sprezi. Kada dodje do reagovanja najnižeg iskrišta, istovremeno reaguju i ostala iskrišta, čime se kondenzatori



Slika 7.38: Višestepeni udarni generator po Marx-u

prevezuju na red. Otpornici R se biraju tako da imaju dovoljno veliku otpornost da ne dolazi do rasterećenja kondenzatora C_1 u lokalnim konturama. Tako prevezani kondenzatori se prazne preko otpornika R_1 i opterećuju kondenzator C_2 . Svi kondenzatori se zatim zajedno lagano prazne preko otpornika R_2 velike otpornosti. Otpornik R_2 naziva se otpornikom začelja talasa.

Udarni generator se podešava zajedno sa ispitivanim uzorkom u kolu da daje standardni oblik udarnog napona $1,2/50 \mu s/\mu s$ čija je temena vrednost data u tablici 7.4. Ispitivanje uzorka se vrši sa 5 pozitivnih i 5 negativnih udara. Pri ispitivanju, iskrišta odvodnika moraju da reaguju na svaki udar. Ukoliko pri 5 uzastopnih udara bilo kog polariteta iskrišta otkazu samo jednom, mora se izvršiti ispitivanje sa 10 udara tog polariteta, a da iskrišta reaguju svaki put [92].

Pri ovom ispitivanju važe sledeće tolerancije za oblik i amplitudu ispitnog napona:

- Temena vrednost talasa treba da je u granicama od 97 % do 100 % od zadate temene vrednosti,
- Trajanje čela treba da bude u granicama od $0,85 \mu s$ do $1,6 \mu s$ za standardni oblik atmosferskog talasa,
- Začelje treba da bude u granicama od $40 \mu s$ do $60 \mu s$ za standardni oblik atmosferskog talasa.

7.5.4 Odredjivanje udarnog napona reagovanja odvodnika na čelu talasa

Cilj ovog ispitivanja je da pokaže da će oprema u postrojenju biti uspešno zaštićena odvodnikom prenapona čak i ako naidje atmosferski prenapon znatno veće strmine od standardne.

Ispituju se kompletno opremljeni uzorci. Ispitivanje se vrši udarnim naponom čije čelo raste praktično konstantnom brzinom do napona reagovanja. Strmina čela ispitnih napona talasa u funkciji naznačenog napona data je u tablici 7.5.

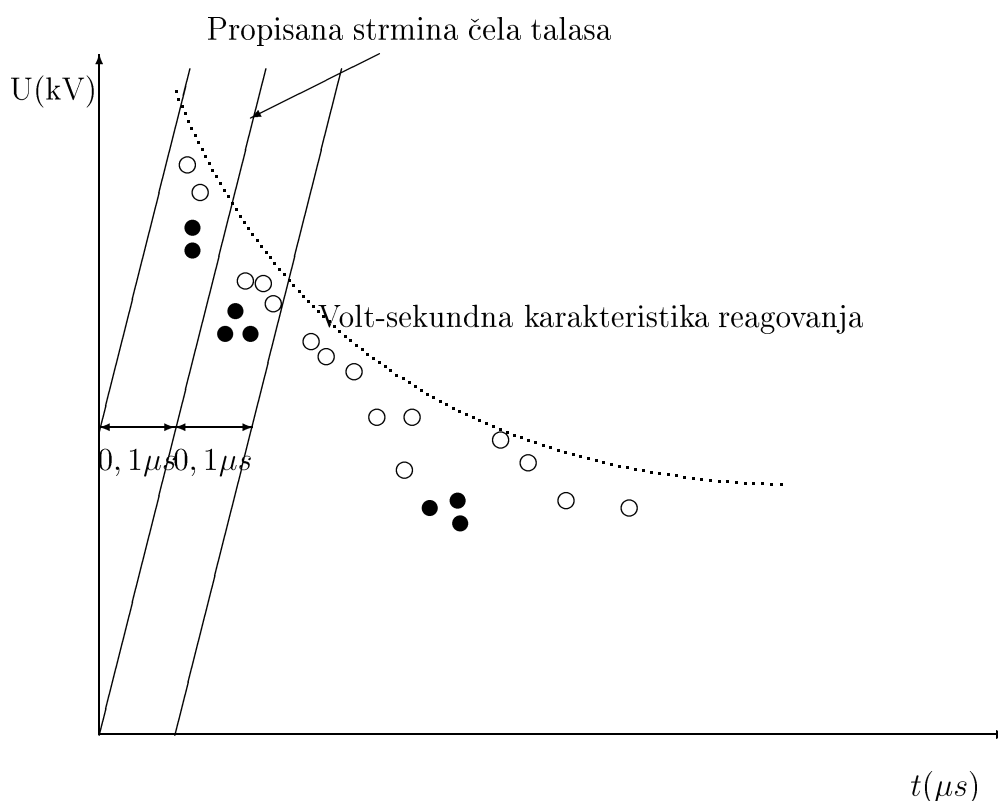
naznačeni napon odvodnika $U_f (kV_{eff})$	Nazivna strmina čela $kV/\mu s$	Maksimalni udarni napon reagovanja ($k\hat{V}$)	
		10 kA odvodnici za teške uslove rada	$\leq 10 kA$ odvodnici za lake uslove rada
$0,15 < U_f \leq 0,3$	10	-	$12,00 U_f$
$0,3 < U_f \leq 0,6$	10	-	$7,50 U_f$
$0,6 < U_f \leq 1,2$	10	-	$6,00 U_f$
$1,2 < U_f \leq 10$	$8,3 U_f$	-	$4,15 U_f$
$10 < U_f \leq 120$	$7,0 U_f$	$3,2 U_f$	$3,85 U_f$
$120 < U_f \leq 200$	$6,0 U_f$	$3,0 U_f$	$3,45 U_f$
$200 < U_f \leq 300$	1300	$3,0 U_f$	-
$300 < U_f \leq 420$	1500	$2,9 U_f$	-
$U_f > 420$	2000	$2,9 U_f$	-

Tabela 7.5: Nazivne strmine i maksimalni udarni naponi reagovanja odvodnika

Svaki odvodnik treba ispitati sa po pet udara pozitivnog i negativnog polariteta.

Za ovo ispitivanje se mogu koristiti i talasi strmina koji su iznad i ispod propisanih. U tu svrhu je potrebno nacrtati obvojnici najviših tačaka krive napon reagovanja-vreme do

reagovanja. Tačka preseka obvojnice sa pravom koja predstavlja čelo talasa propisane strmine iz tablice 7.5 određuje napon reagovanja odvodnika na čelu talasa. Da bi se koristila ova tačka kao napon reagovanja na čelu talasa, formira se tolerancijsko polje od paralelnih pravih pomerenih za $\pm 0,1\mu s$ levo i desno od linearizovanog čela talasa koje polazi iz koordinatnog početka, kao na slici 7.39.



Slika 7.39: Dobijanje napona reagovanja na čelu talasa

Ako postoji najmanje pet pozitivnih i pet negativnih udara unutar tolerancijskog polja oko linearizovanog čela talasa propisane strmine, dozvoljava se korišćenje preseka obvojnice sa pravom koja predstavlja čelo talasa propisane strmine. Prilikom ispitivanja odvodnika talasom propisane strmine u cilju određivanja napona reagovanja na čelu talasa, između udarnog naponskog generatora i odvodnika se postavlja otpornik koji ima dve svrhe:

- Ograničava se struja kroz odvodnik posle reagovanja,
- Snižava se vrednost preostalog napona na odvodniku posle reagovanja, što omogućava jasno uočavanje trenutka reagovanja, posle koga dolazi do sniženja napona na odvodniku.

Ako ne bi bilo otpornika za ograničenje struje, moglo bi se desiti da preostali napon bude visine koja je bliska naponu reagovanja, pa bi bilo teškoća u njihovom razlikovanju.

Ukoliko se ne koristi obvojnica za dobijanje vremena reagovanja na čelu talasa, već se direktno snima trenutak reagovanja odvodnika pri primeni talasa propisane strmine, tada se prvo vrši ispitivanje standardnim talasom čija je amplituda i strmina upola manja od propisane. U tom slučaju odvodnik, koji se nalazi u ispitnom kolu, sigurno neće da reaguje. Tek kada se tako podese parametri talasa, pristupa se ispitivanju napona reagovanja na čelu talasa punim naponskim talasom propisane strmine iz tablice 7.5.

Izmereni napon reagovanja na čelu talasa ne sme da premaši propisani napon reagovanja iz tablice 7.5.

7.5.5 Odredjivanje karakteristike reagovanja odvodnika

Karakteristika reagovanja odvodnika predstavlja grafički prikaz napona reagovanja u funkciji vremena do reagovanja. Ispitivanje se radi standardnim atmosferskim udarnim talasom $1,2/50 \mu s$ različitih amplituda i sklopnim udarnim talasom. Ispitivanje se započinje udarnim talasom čija je amplituda manja od napona reagovanja, a zatim se u svakom narednom udaru amplituda napona povećava u malim skokovima dok se ne postigne strmina talasa koja je data u tablici 7.5. Talasni oblik napona se snima, a sa snimka se odredjuje napon reagovanja i vreme do reagovanja.

Za vremena do reagovanja koja su dosta duža od onih koja odgovaraju standardnim atmosferskim udarnim naponima (reagovanje na sklopne prenapone), koriste se talasi sa vremenima čela u sledećim opsezima:

1. $30 \mu s \div 60 \mu s$
2. $150 \mu s \div 300 \mu s$
3. $1000 \mu s \div 2000 \mu s$

Ispitivanja sklopnim udarnim naponima se rade samo za odvodnike nazivnih struja odvajanja od $10 kA$ za lake i teške uslove rada, čiji je naznačeni napon preko $100 kV$.

Pri odredjivanju dela krive koji se odnosi na sklopne prenapone prvo se ispitivanja vrše talasom čija je amplituda manja od 50% napona reagovanja odvodnika. Zatim se amplituda talasa povećava u skokovima od po 5% sve do pojave reagovanja odvodnika. Sa ovim naponom se izvrši serija ispitivanja od 5 udara u koju ulazi i prvi udar pri kome je

došlo do reagovanja odvodnika. U svakom narednom udaru se smanjuje amplituda udarnog talasa za 5% ako je odvodnik u prethodnom udaru reagovao, a poveća za 5% ako odvodnik nije reagovao. Podešavanje amplitude talasa se vrši naponom punjenja udarnog generatora ili kontrolom trenutka okidanja prvog iskrišta udarnog generatora. 50%-tni udarni napon reagovanja ($U_{50\%}$) se dobija kao srednja vrednost najviših napona kod 5 ispitivanja.

Posle ove serije ispitivanja se sprovodi dodatnih 10 udara dizanjem napona punjenja udarnog generatora tako da se dobije očekivana amplituda napona koja je za 40% viša od $U_{50\%}$. Volt-sekundna karakteristika reagovanja odvodnika se određuje na osnovu tačaka čija je jedna koordinata napon na odvodniku neposredno pre reagovanja, a druga koordinata vreme do reagovanja, koje se meri od konvencionalnog početka talasa.

Na osnovu snimaka talasnih oblika napona nastalih registrovanjem 50% sklopnog udarnog napona i tokom ispitivanja naponom čija je amplituda $1,4 \cdot U_{50\%}$ dobija se kriva udarni napon reagovanja-vreme do reagovanja za sklopne talase. Ova kriva se povezuje sa krivom atmosferski udarni napon reagovanja-vreme do reagovanja radi dobijanja krive koja pokriva širok opseg talasnih oblika. Kriva se crta provlačenjem ravne linije kroz sredinu tačaka dobijenih ispitivanjem talasima oba polariteta.

Dobijanje volt-sekundne karakteristike reagovanja objašnjeno je na slici 7.40.

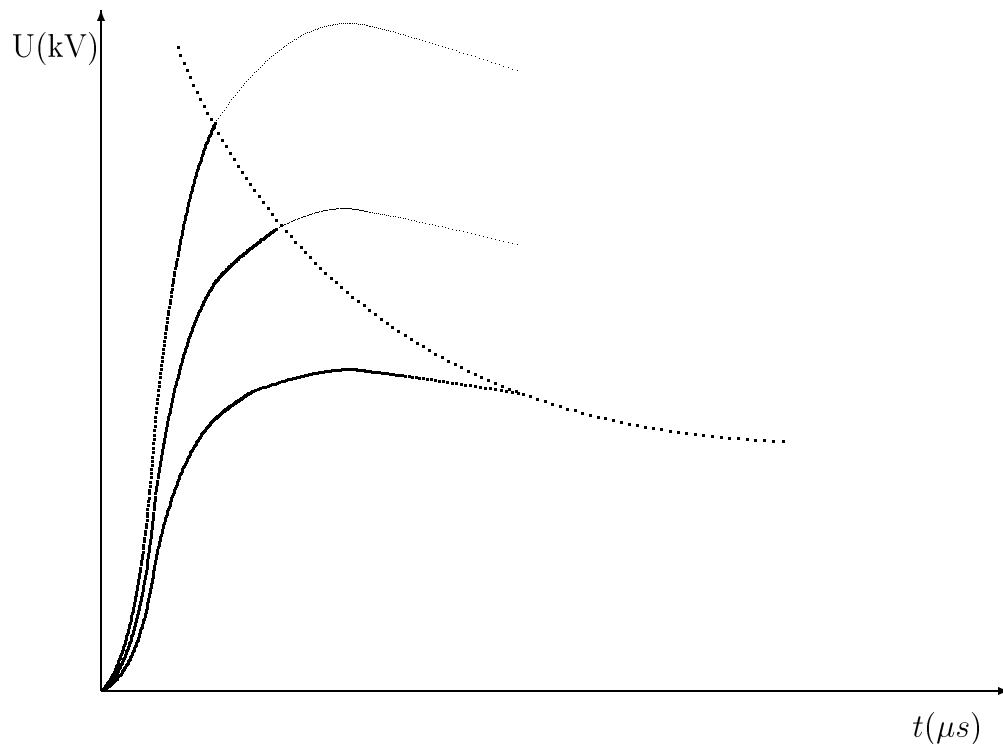
Sa slike se može uočiti da strmi talasi dovode do reagovanja pri višem naponu, dok talasi sa manjom brzinom porasta na čelu izazivaju kasnije reagovanje odvodnika. Povećanje napona reagovanja odvodnika je posebno izraženo za talase strmine koja je veća od strmine standardnog talasa koji ima vreme čela od $1,2 \mu s$.

7.5.6 Odredjivanje preostalog napona odvodnika

Karakteristika preostalog napona u funkciji struje se određuje na taj način što se kompletan uzorak odvodnika prenapona ili njegova sekcija podvrgavaju udarnoj struji. Pri tome najmanja vrednost preostalog odvodnika sme da bude $3 kV$, a najveća $12 kV$. Ovo važi za sve odvodnike čiji je nazivni napon preko $3 kV$. Ako se ispitivanje vrši po sekcijama, tada se preostali napon kompletnog odvodnika dobija kao preostali napon sekcije pomnožen brojem sekcija.

Preostali napon pri atmosferskom udarnom talasu

Za odredjivanje preostalog napona pri atmosferskom udarnom talasu se koristi standardni atmosferski udarni strujni talas oblika $8/20 \mu s/\mu s$, sa sledećim tolerancijama:



Slika 7.40: Dobijanje volt-sekundne karakteristike reagovanja

- vreme čela treba da bude od 7 do 9 μs ,
- vreme začelja (vreme potrebno da struja opadne na polovinu maksimalne vrednosti) treba da bude u granicama 18 do 22 μs .

Kolo za dobijanje kratkotrajne udarne struje atmosferskog talasa prikazano je na slici 7.41.

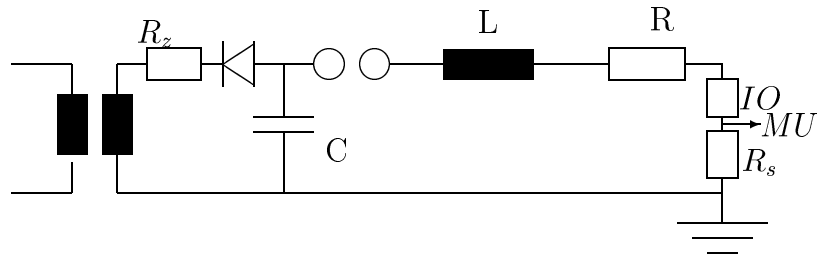
Oznake na slici 7.41 imaju sledeće značenje:

R_z —zaštitni otpornik za ograničavanje struje punjenja kondenzatora,

C —baterija od većeg broja paralelno vezanih kondenzatora,

L —ekvivalentna induktivnost kola koja u sebi sadrži induktivnost kalema za podešavanje oblika udarne struje, kao i sve parazitne induktivnosti veza i interne induktivnosti kondenzatora,

R —ekvivalentna otpornost svih delova kola koja u sebi sadrži i otpornost objekta ispitivanja,



Slika 7.41: Kolo za dobijanje kratkotrajne udarne struje atmosferskog talasa

I_O —objekat ispitivanja,

R_s —šant za merenje udarne struje,

MU —merni uređaj pomoću koga se snima i registruje talasni oblik struje (najčešće osciloskop).

Udarni generator radi na tom principu što se prvo preko ispravljača napuni kondenzator C do dovoljno visokog napona, a zatim dolazi do preskoka na iskrištu, što dovodi do njegovog rasterećenja i obrazovanja strujnog talasa kroz objekat ispitivanja. Amplituda udarne struje se može proceniti iz izraza:

$$I_{max} = k \cdot \frac{U_o}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (7.22)$$

gde su:

k —konstanta manja od 1 koja zavisi od prigušenja u kolu,

U_o —napon punjenja strujnog udarnog generatora.

U zavisnosti od parametara kola udarni generator može da daje oscilatorno prigušene, aperiodične ili aperiodično kritične talase. Optimalni rezultati se postižu sa oscilatorno prigušenim talasima.

Talasi se primenjuju na tri uzorka. Na svakom uzorku se primenjuje najmanje četiri udara, čije su temene vrednosti:

$0,25 \cdot I_n$	$0,5 \cdot I_n$	$1 \cdot I_n$	$2 \cdot I_n$
------------------	-----------------	---------------	---------------

gde je I_n —nazivna struja odvodjenja odvodnika. Izmedju dva ispitivanja udarnom strujom odvodnik mora da se ohladi do temperature ambijenta.

Povezivanjem temenih vrednosti izmerenih preostalih napona za različite amplitude udarnih struja dobija se karakteristika preostalog napona odvodnika ili **volt-amperska karakteristika odvodnika**.

Osim karakteristike preostalog napona odvodnika važan podatak koji karakteriše odvodnik je **preostali napon pri nazivnoj struji odvodjenja**. Ovaj podatak se dobija ponovljenim ispitivanjem odvodnika sa sledećim vrednostima udarnih struja:

$$\boxed{0,8 \cdot I_n \quad 1,0 \cdot I_n \quad 1,2 \cdot I_n}$$

Na osnovu izmerenih vrednosti preostalih napona za struje koje su bliske nazivnoj struji odvodjenja može se tačnije odrediti vrednost preostalog napona pri nazivnoj struji odvodjenja.

Preostali napon pri sklopnom udarnom talasu

Kod ispitivanja sklopnim udarnim strujnim talasom radi odredjivanja preostalog napona razlikujemo sledeće slučajeve:

- Odvodnici klase 10 kA za teške uslove rada
- Odvodnici klase 10 kA za lake uslove rada
- Odvodnici klase 5 kA koji imaju naznačeni napon iznad 100 kV.

Naznačeni napon uzorka mora biti 3 kV ili više, ali ne više od 6 kV.

Za dobijanje sklopnog udarnog talasa se koristi generator pravougaonog strujnog talasa sa rasporedjenim parametrima, čija je šema data na slici 7.42.

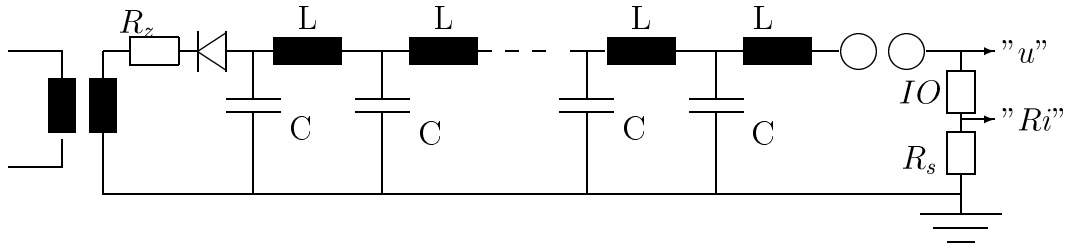
Oznake na slici 7.42 imaju sledeće značenje:

C —kapacitivnosti udarnog generatora sa rasporedjenim parametrima,

L —induktivnosti udarnog generatora sa rasporedjenim parametrima,

IO —ispitivani objekat (uzorak odvodnika prenapona),

R_s —otpornost šanta za merenje udarnih struja,



Slika 7.42: Kolo za dobijanje dugotrajne udarne struje sklopnog talasa

" u " – naponski signal koji se preko odgovarajućeg delila napona vodi na osciloskop,

" Ri " – Naponski signal sazmeran struji kroz odvodnik koji se sa šanta vodi na osciloskop.

Svi kondenzatori su napunjeni do određenog jednosmernog napona U_o kada dolazi do reagovanja iskrišta. Posle toga dolazi do rasterećenja kondenzatora C preko rednih induktivnosti L , što dovodi do obrazovanja približno pravougaonog strujnog talasa. Prema preporuci IEC [92] broj LC sekcija generatora pravougaonih strujnih talasa treba da iznosi oko 10.

Snimanje struje se vrši preko šanta koji je na red vezan sa kolom udarnog generatora.

Približna vrednost amplitude struje koju generator pravougaonog talasa daje, uz zanemaren uticaj otpornosti u kolu, iznosi:

$$I = \frac{U_o}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (7.23)$$

Trajanje strujnog impulsa iznosi:

$$T = n \cdot \sqrt{LC} \quad (7.24)$$

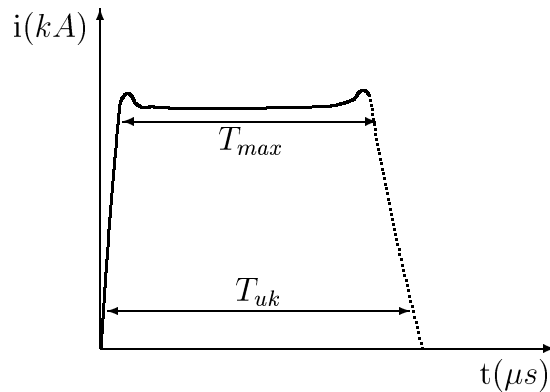
gde je n broj sekcija generatora pravougaonog talasa.

Ako se na red sa ispitivanim objektom veže dodatni otpornik R_{dod} tako da bude ispunjen uslov da je $R_{io} + R_s + R_{dod} = Z_c$, gde je Z_c karakteristična impedansa veštačkog voda:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (7.25)$$

tada se dobija dvostruko manja amplituda struje i dvostruko duže trajanje talasa.

Tipičan oscilogram dugotrajne struje prikazan je na slici 7.43.



Slika 7.43: Tipičan oscilogram struje dugog trajanja

Na slici 7.43 su date oznake pojedinih karakteristika pravougaonog strujnog talasa.

Pod **temenom vrednošću struje pravougaonog talasa** se podrazumeva maksimalna vrednost struje koju daje udarni generator. Ukoliko se na početku ili kraju talasa pojavljuje previšenje ili oscilacije u toku trajanja impulsa čija je amplituda manja od 10% od temene vrednosti struje, one se tolerišu, a maksimalna vrednost se određuje povlačenjem srednje linije kroz oscilaciju,

Pod **konvencionalnim trajanjem maksimalne vrednosti struje** T_{max} se podrazumeva vreme kada talas ima vrednost iznad 90% od temene vrednosti struje,

Konvencionalno trajanje maksimuma struje treba da je između 100% i 120% od vrednosti iz tablice 7.7,

Pod **ukupnim konvencionalnim trajanjem struje** T_{uk} se podrazumeva vreme kada talas ima vrednost iznad 10% od temene vrednosti struje,

Ukupno konvencionalno vreme strujnog talasa ne treba da prelazi 150 % od trajanja konvencionalnog trajanja maksimalne vrednosti struje.

7.5.7 Ispitivanja podnosivom udarnom strujom

Za razliku od strujnih ispitivanja koja su radjena radi dobijanja karakteristike preostalog napona, koja predstavlja jedan od važnih pokazatelja zaštitne karakteristike odvodnika, ispitivanja podnosivom strujom imaju za cilj jedino da provere energetska sposobnost odvodnika.

Ispitivanja se vrše samo sekcijama odvodnika naznačenih napona najmanje 3 kV, a najviše 6 kV. U slučaju odvodnika prenapona nižeg naznačenog napona od 3 kV ispitivanja se rade na kompletnim odvodnicima. Cilj ispitivanja je da se provere granične energetske karakteristike odvodnika. Kod odvodnika koji imaju uređaj za odvajanje ova ispitivanja se rade na odvodniku koji je snabdeven ovim uređajem. Pre početka ispitivanja se za svaki uzorak proveriti napon reagovanja industrijske frekvencije.

Ispitivanje udarnom strujom velike amplitude

Ispitivanja se rade strujom oblika 4/10 $\mu s/\mu s$. Amplitude udarnih struja date su u tablici 7.6.

Klasa odvodnika (Nazivna struja odvodjenja) <i>kA</i>	Temena vrednost udarne struje velike amplitude <i>kA</i>
10	100
5	65
2.5	25
1.5	10

Tabela 7.6: Temene vrednosti udarnih struja velike amplitude

Ispitivanja se rade sa dva strujna udara izmedju kojih je dopušteno da se uzorak ohladi na temperaturu blisku temperaturi ambijenta. Za vreme ispitivanja se snimaju struja kroz odvodnik i preostali napon na odvodniku. Analizom snimaka se mora utvrditi da nema bitnih razlika izmedju snimaka kod prvog i drugog udara.

Pri ispitivanju se zahtevaju karakteristike udarnog strujnog talasa unutar sledećih tolerancija:

- amplituda talasa treba da je izmedju 90 % i 110 % od tražene temene vrednosti,
- trajanje čela talasa izmedju 3,5 μs i 4,5 μs ,
- trajanje začelja talasa izmedju 9 μs i 11 μs ,
- u slučaju da je struja oscilatorne prirode, u drugoj poluperiodi struje suprotnog polariteta temena vrednost ne sme da predje 10 % od amplitude prve poluperiode.

- dozvoljavaju se izvesne oscilacije na talasu, koje u blizini temene vrednosti strujnog talasa moraju biti manje od 5 % od amplitude struje. Pri merenju struje se u tom slučaju provlači srednja kriva kroz oscilaciju.

Posle završetka ispitivanja odvodnika udarnom strujom velike amplitude, kada se odvodnik ohladio na temperaturu ambijenta, proverava se napon reagovanja odvodnika na napon industrijske učestanosti. Na ovaj način se vrši provera ispravnosti iskrišta odvodnika, koje je moglo pri uticaju dejstva velike struje da bude degradirano.

Ispitivanje dugotrajnom udarnom strujom

Ispitivanje dugotrajnom udarnom strujom se sprovodi pomoću ranije opisanog generatora pravougaonih udarnih talasa sa rasporedjenim parametrima, sa karakteristikama koje su date u tablici 7.7 za odvodnike klase 10 kA za teške uslove rada.

Klasa odvodnika u odnosu na struju dugog trajanja	Otpornost zaštitnog otpornika $R_1(\Omega)$	Konvencionalno trajanje maksimuma μs	Napon punjenja $kV\ dc$
1	$3,3 \cdot U_u$	2000	$3,0 \cdot U_u$
2	$1,8 \cdot U_u$	2000	$2,6 \cdot U_u$
3	$1,2 \cdot U_u$	2400	$2,6 \cdot U_u$
4	$0,8 \cdot U_u$	2800	$2,4 \cdot U_u$
5	$0,5 \cdot U_u$	3200	$2,2 \cdot U_u$

Tabela 7.7: Osnovni parametri dugotrajnog strujnog talasa za odvodnike 10 kA za teške uslove rada

U tablici 7.7 U_u označava naznačeni napon uzorka koji se ispituje, a R_1 predstavlja otpornost otpornika koji se vezuje na red sa ispitivanim objektom radi ograničenja struje pražnjenja. Može se uočiti da propisi ne specificiraju struju pražnjenja, već napon punjenja generatora (kao funkcija naznačenog napona odvodnika ili uzorka) i otpornost otpornika (takodje u funkciji naznačenog napona uzorka).

Odvodnici prenapona su podeljeni u klase od 1 do 5 u zavisnosti od sposobnosti da podnesu struje dugog trajanja koje simuliraju naprezanja u odvodniku pri pojavi reagovanja na sklopne prenapone.

Pri ispitivanju se može dogoditi kod odvodnika sa magnetskim oduvavanjem luka da se ne može postići traženi oblik i trajanje struje zbog aktivne uloge iskrišta u ograničavanju

struje. U tom slučaju se prethodno mora izvršiti kalibracija generatora udarnih struja dugog trajanja u pogledu broja sekcija i vrednosti elemenata. Kalibracija se radi pri sniženom naponu napajanja udarnog generatora, ali ne manje od 0,5 od specificiranog napona opterećenja. Pri kalibraciji se umesto odvodnika prenapona stavlja otpornik R_1 koji treba da zameni ispitni uzorak odvodnika.

Ispitivanje udarnom strujom se sastoji iz 20 operacija rasterećenja, koje su podeljene u četiri grupe od po 5 operacija. Intervali između pojedinih operacija su 50 s do 60 s, a pauza između grupa ispitivanja je 25 min do 30 min. Pri ispitivanju se vrši upoređenje prvog i poslednjeg talasnog oblika napona i struja u cilju provere ispravnosti karakteristika odvodnika posle ispitivanja.

Kada se ispitni uzorak ohladi na temperaturu ambijenta, vrši se provera napona reaganja industrijske frekvencije i preostalog napona, koji se upoređuju sa vrednostima pre ispitivanja dugotrajnom udarnom strujom.

U slučaju 10 kA odvodnika za lake uslove rada, kao i odvodnika klase 5000 A i 2500 A ispitivanje dugotrajnom udarnom strujom se vrši samo na nelinearnim otpornicima. Pri ovom ispitivanju nije neophodno podešavanje generatora, jer je eliminisan uticaj iskrišta sa magnetskim oduvavanjem luka na oblik udarne struje.

U tabeli 7.8 date su amplitude struja dugog trajanja, kao i konvencionalno trajanje temena struja za različite klase odvodnika za lake uslove rada.

Klasa odvodnika kA	Temena vrednost struje A	konvencionalno trajanje temena (μs)
10	150	2000
5	75	1000
2.5	50	500

Tabela 7.8: Dugotrajna udarna struja odvodnika 10 kA za lakše uslove rada, 5 kA i 2,5 kA odvodnika

Odvodnici klase 10 kA se dele na odvodnike za teške uslove rada (koji štite i od sklopnih prenapona) i odvodnike za lake uslove rada (koji štite samo od atmosferskih prenapona). Odvodnici klase 5 kA dele se na seriju A koja se primenjuje u svim državama i seriju B koja se primenjuje u SAD, Kanadi i nekim drugim državama.

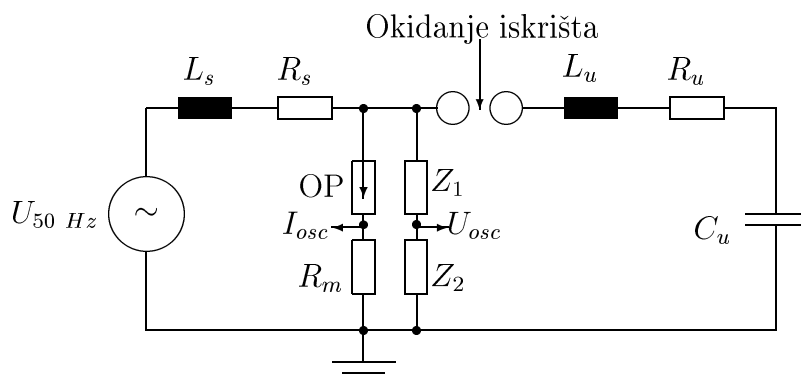
7.5.8 Ispitivanje odvodnika u radnim uslovima

U radnim uslovima se odvodnik ispituje strujnim udarima oblika $8/20 \mu s/\mu s$ pri istovremenom postojanju radnog napona. Ispitivanja se mogu raditi na kompletnim odvodnicima ili na sekcijama od 3 do 12 kV . Iako je poželjno da se ispitivanja rade na kompletnim odvodnicima, zbog ograničenja ispitne opreme se ispitivanja rade samo do određenog naponskog nivoa. Ukoliko je raspodela napona po elementima odvodnika ravnomerna, tada se jednostavno može odrediti napon kojim se ispituje uzorak kao n puta manji napon od naznačenog napona kompletnog odvodnika. Međutim, ako raspodela napona duž odvodnika nije ravnomerna, tada se biraju kombinacije iskrišta i nelinearnih otpornika koje su različite od kombinacija u kompletnom odvodniku, da bi se dobio isti oblik i amplituda prateće struje kao kod kompletnog odvodnika.

Pre ispitivanja u radnim uslovima se vrši merenje napona reagovanja industrijske frekvencije i preostalog napona odvodnika.

U toku ispitivanja odvodnika u radnim uslovima odvodnik je podvrgnut naponu industrijske učestanosti iz izvora koji ima dovoljnu snagu da u toku proticanja prateće struje napon na uzorku ne opadne ispod vrednosti naznačenog napona uzorka, a po prekidu proticanja prateće struje napon ne sme da poraste više od 10 % od naznačenog napona uzorka.

Strujni udarni talas se preko iskrišta injektira u tačno određenom trenutku u toku periode napona industrijske učestanosti. Ekvivalentna šema uređaja za ispitivanje je prikazana na slici 7.44.



Slika 7.44: Ispitno kolo za ispitivanje odvodnika u radnim uslovima

Na slici 7.44 oznake imaju sledeće značenje:

$U_{50\text{ Hz}}$ –izvor napona industrijske učestanosti koji obezbeđuje proticanje propratne struje kroz odvodnik nakon njegovog reagovanja,

L_s –induktivnost izvora naizmeničnog napona,

R_s –otpornost otpornika sa strane izvora naizmeničnog napona čija je uloga da spreči proticanje udarne struje iz udarnog generatora kroz generator naizmeničnog napona,

L_u –induktivnost strujnog udarnog generatora,

R_u –otpornost strujnog udarnog generatora,

C_u –ekvivalentna kapacitivnost kondenzatora strujnog udarnog generatora.

OP –odvodnik prenapona koji se ispituje,

R_m –otpornost mernog šanta,

Z_1, Z_2 –visokonaponska i niskonaponska grana delila napona,

I_{osc} –pad napona sa mernog šanta koji se vodi na jedan kanal osciloskopa,

U_{osc} –napon sa delila napona koji se vodi na drugi kanal osciloskopa.

Iskrište udarnog generatora je uradjeno kao troelektrodno, gde su dve elektrode sfere izmedju kojih se uspostavlja strujno kolo, a na treću elektrodu se dovodi visokonaponski impuls za okidanje iz specijalnog uredjaja za okidanje. Visokonaponski impuls inicira varnicu, koja se zatim uspostavi izmedju glavnih elektroda. Uredjaj za okidanje je sinhronizovan sa izvorom naizmeničnog napona, tako da se može precizno podešavati trenutak injektiranja struje unutar periode napona industrijske učestanosti.

U prvom udaru se podesi da se struja injektira na 60° električnih pre maksimuma napona. Ukoliko se ne uspostavi propratna struja koja je u skladu sa trenutkom okidanja iskrišta, vreme okidanja se usporava za oko 10° električnih prema maksimumu napona. Procedura se ponavlja sve dok se ne postigne saglasnost struje sa vremenom okidanja. Polaritet injektirane struje treba da se poklapa sa polaritetom napona u trenutku injektiranja.

Propratna struja se neće uspostaviti ako se okidanje udarnog generatora vrši pri niskoj vrednosti radnog napona, jer se luk na iskrištu spontano gasi zbog male vrednosti propratne struje izazvane niskim naponom u trenutku reagovanja odvodnika. Zbog toga je potrebno pomeriti trenutak injektiranja struje bliže maksimumu napona. Sa druge strane, što se ranije injektira udarna struja ispred maksimuma radnog napona, to je duža izloženost odvodnika propratnoj struji do prve nule napona industrijske učestanosti u kojoj treba propratna struja da se prekine i veće je termičko naprezanje odvodnika.

Ispitivanje se radi sa dvadeset udara, sa po četiri grupe od po 5 udara. Interval između svaka dva udara je 50 s do 60 s, a pauza između grupa 25 min do 30 min. Mora se snimiti jedna kompletna perioda napona industrijske učestanosti pre injektiranja udarne struje i jedna kompletna perioda posle gašenja propratne struje. Odvodnik ne mora biti priključen na radni napon za vreme trajanja ispitivanja i u pauzama između grupa, ali mora biti priključen najmanje 10 s nakon završetka poslednje grupe ispitivanja.

Merene vrednosti strujnog talasa moraju da budu u sledećim tolerancijama:

- amplituda talasa mora biti između 90 % i 110 % od temene vrednosti struje,
- vreme čela treba da bude od 7 do 9 μs ,
- vreme začelja treba da bude u granicama 18 do 22 μs .

Pri svakom udaru se mora uspostaviti propratna struja i svaki put se propratna struja mora prekinuti.

Posle završetka ispitivanja se proverava napon reagovanja pri naponu industrijske frekvencije i preostali napon odvodnika. Odstupanja izmerenih vrednosti posle ispitivanja ne smeju biti veća od 10 % u odnosu na rezultate pre ispitivanja u radnim uslovima.

7.5.9 Ispitivanje uređaja za ograničenje pritiska

Ukoliko je odvodnik snabdeven uređajem za ograničenje pritiska, tada se mora sprovesti ispitivanje sposobnosti odvodnika da podnese odgovarajuća naprezanja. U tu svrhu se formira ispitni uzorak odvodnika na taj način što se u novo kućište stavljaju elementi odvodnika, a iskrišta i nelinearni otpornici se premošćuju topljivom žicom za osigurače. Ova žica mora da se istopi u toku prvih 30° električnih nakon primene ispitne struje. Žica treba da bude tako postavljena da prati konture elemenata odvodnika.

Svaki uzorak posebno mora da bude ispitan sa sledećim strujama:

- Ispitna struja industrijske frekvencije velike amplitude,
- Ispitna struja industrijske frekvencije male amplitude.

Ispitivanje se vrši strujom iz izvora čija je snaga kratkog spoja tolika da efektivna vrednost naizmenične komponente struje ne padne ispod 75 % od utvrdjene vrednosti struje kratkog

spoja pri prespojenom odvodniku za vreme od bar 0,2 s. Ispitivanje se radi u monofaznom kolu sa naponom izvora izmedju 77 % i 107 % od naznačenog napona odvodnika. Pri kratkospojenom odvodniku struje kratkog spoja izvora za različite klase odvodnika date su u tablici 7.9.

Klasa ograničenja pritiska	Klasa odvodnika (kA)	Minimalna očekivana simetrična struja kvara kA_{eff}
80	10 (t.u)	80
63	10 (t.u)	63
50	10 (t.u)	50
40 (A)	10 (t.u) ili (l.u)	40
20 (B)	10 (t.u) ili (l.u)	20
10 (C)	10 (t.u) ili (l.u)	10
16 (D)	(5 serija A)	16
5 (E)	(5 serija A)	5

Tabela 7.9: Struje kratkog spoja izvora za razne klase odvodnika

Oznake u tablici 7.9 imaju sledeće značenje:

(t.u.)—teški uslovi rada,

(l.u.)—laki uslovi rada,

U toku ispitivanja sa uključenim elementima odvodnika (skinuta kratka veza koja prespaja odvodnik) i postavljenom topljivom žicom koja treba da inicira luk, struja kroz odvodnik može da bude smanjena usled uticaja otpora električnog luka unutar kućišta. Medjutim, ukupna oslobođena energija unutar odvodnika srazmerna je proizvodu struje i pada napona na luku, tako da promena struje usled povećanja otpora kola usled dejstva električnog luka ne izaziva smanjenje naprezanja odvodnika prenapona.

Ispitivanje strujom industrijske učestanosti male amplitude vrši se pri naponu na uzorku koji je 77 % do 107 % od naznačenog napona uzorka, sa parametrima kola koji daju struju kroz uzorak od $800 A_{eff} (\pm 10 \%)$ izmerenu približno posle 0,1 s. Struja može da opadne do trenutka pojave izbacivanja gasova za najviše 10 % od izmerene početne vrednosti. Struja treba da protiče kroz uzorak sve dok ne deluje ventil i ne oslobodi gasove.

Ukoliko odvodnik ne izvrši izbacivanje gasova, treba biti veoma obazriv sa odvodnikom jer se čak i posle hladjenja u njemu može zadržati visok pritisak.

7.5.10 Ispitivanje uređaja za odvajanje odvodnika

Ako je odvodnik snabdeven uređajem za odvajanje u slučaju neispravnog rada odvodnika, tada se mora proveriti ispravnost rada ovog uređaja. Ispitivanje podnošenja velikih stuja pri radu odvodnika vrši se primenom sledećih testova:

- ispitivanje podnosivom velikom udarnom strujom,
- ispitivanje podnosivom dugotrajnom udarnom strujom,
- ispitivanje u radnim uslovima.

Gornja ispitivanja se rade istovremeno kada se vrši ispitivanje samog odvodnika. Pri ispitivanju uređaj ne sme da reaguje i odvoji odvodnik, jer bi u tom slučaju to značilo da je uređaj za odvajanje osetljiv na uslove pri normalnom reagovanju odvodnika.

Pored ispitivanja podnosivom udarnom strujom i pri radnim uslovima, mora se ispitati funkcionisanje uređaja.

Odredjivanje krive reagovanja uređaja za odvajanje predstavlja odredjivanje vremena do odvajanja u funkciji struje kroz uređaj za odvajanje. Ovo ispitivanje se može raditi na odvojenom uređaju za odvajanje ili na uređaju koji je učvršćen na odvodnik, u zavisnosti da li unutrašnje grejanje odvodnika pri proticanju struje kroz njega utiče na rad uređaja za odvajanje ili ne.

Ukoliko grejanje odvodnika utiče na rad uređaja za odvajanje, tada se unutrašnji nelinearni otpornici i iskrišta premošćuju topljivom žicom da bi se započeo interni luk u odvodniku. U suprotnom, ukoliko odvodnik služi kao nosač uređaja za odvajanje, tada su iskrišta i nelinearni otpornici odvodnika premošćeni. Ako uređaj za odvajanje nije sastavni deo odvodnika, tada se on može ispitati samostalno.

Odredjivanje karakteristike reagovanja uređaja za odvajanje se radi za tri različita nivoa naizmeničnih struja. To su struje efektivnih vrednosti 20 A, 200 A i 800 A. Ispitne struje treba tako realizovati da imaju samo naizmeničnu komponentu, što se postiže podešavanjem trenutka uključenja struje.

Podešavanje kola za dobijanje odgovarajuće ispitne struje se radi pri kratko-spojenom uzorku za vreme kalibracije kola.

Propisi zahtevaju ispitivanje po pet uzoraka za svaki od tri strujna nivoa.

Za sve ispitivane uzorke se ucrtaju tačke koje odgovaraju efektivnim vrednostima struje kroz uzorak i odgovarajuća vremena do početka rada uredjaja za odvajanje. Karakteristika reagovanja predstavlja srednju liniju povučenu izmedju dobijenih tačaka.

Kod uredjaja za odvajanje koji deluju vrlo sporo, ispitivanja se vrše strujama određenog trajanja. Ispitivanja se rade sa strujama određena tri nivoa koje se isključuju posle određenog vremena za koje uredjaj treba da odvoji odvodnik. Zbog inercije uredjaj će odvojiti iako je struja već prekinuta. Na ovaj način treba izvršiti 5 ispitivanja i pri svakom ispitivanju uredjaj mora uspešno da odvoji. Ukoliko uredjaj jednom zataji, tada se zahteva 5 dodatnih ispitivanja u kojima uredjaj mora uspešno da obavi svoju funkciju.

Uredjaj mora jasno da pokaže da je izvršio potpuno i trajno odvajanje odvodnika. Da bi se to proverilo, uredjaj koji je odvojio odvodnik se napaja naponom industrijske učestanosti napona koji je 1, 2 puta naznačeni napon odvodnika, pri kome kroz uredjaj treba da protiče struja efektivne vrednosti koja je manja od 1 mA.

7.6 Komadna i prijemna ispitivanja

7.6.1 Komadna ispitivanja

Svaki proizvedeni komad odvodnika prenapona mora da se ispita naponom reagovanja industrijske frekvencije. Ispitivanja se rade na jedinicama odvodnika ili na celim odvodnicima. Ispitivanja se rade samo na suvom.

7.6.2 Standardna prijemna ispitivanja

Prijemna ispitivanja se izvode ukoliko ih naručilac zahteva. Izvode se na broju uzoraka koji se definiše na sledeći način:

$$N_{uz} = Max_{int}(\sqrt[3]{N_{odv}}) \quad (7.26)$$

gde su:

N_{uz} —broj uzoraka koji se ispituje,

N_{odv} —broj odvodnika koji se isporučuje,

Max_{Int} —najveći ceo broj od decimalnog broja.

Kod prijemnih ispitivanja se na svakom odabranom odvodniku odredjuju sledeće karakteristike:

- napon reagovanja industrijske frekvencije na suvom,
- napon reagovanja kompletnog odvodnika na standardni atmosferski udarni napon,
- preostali napon, u slučaju posebnog dogovora između proizvođača i kupca, koji se snima pri struji koja nije manja od 0,25 puta nazivna struja odvodjenja.

7.7 Ispitivanje ZnO odvodnika prenapona

7.7.1 Tipska ispitivanja

Sledeća tipska ispitivanja se zahtevaju za ZnO odvodnike prenapona:

1. Odredjivanje preostalog napona odvodnika
2. Ispitivanje podnosivim udarnim strujama
3. Ispitivanje u radnim uslovima
4. Ispitivanje toplotne stabilnosti
5. Ispitivanje toplotnog odziva odvodnika
6. Ispitivanje u uslovima veštačkog zagađenja
7. Ispitivanje uređaja za ograničenje pritiska
8. Ispitivanje uređaja za odvajanje odvodnika

7.7.2 Odredjivanje preostalog napona odvodnika

Ispitivanje se sprovodi na kompletnim odvodnicima ili njegovim sekcijama. Naznačeni napon uzoraka treba da bude najmanje 3 kV, ali ne više od 12 kV, sem ako je naznačeni napon kompletnog odvodnika manji od 3 kV.

Klasa odvodnika kA	klasa struje dugog trajanja	Amplituda struje A
20 teški uslovi 15 teški uslovi 10 teški uslovi	4 i 5	2000
10 teški uslovi	3	1000
10 teški uslovi	1 i 2	500
10 laki uslovi		150
5 serije A i B		75
2,5		50

Tabela 7.10: Amplitude struja pri ispitivanju preostalog napona odvodnika

Karakteristika se crta kao preostali napon u funkciji struje kroz odvodnik. Ispitivanje se vrši za tri različita oblika strujnog talasa:

- Strujni talas strmog čela (čije je trajanje čela $1\ \mu s$, sa tolerancijom od $\pm 10\%$). Amplituda talasa odgovara nazivnoj struji rasterećenja odvodnika.
- Standardni atmosferski strujni talas (trajanje čela je $8\ \mu s$, a trajanje začelja $20\ \mu s$, sa tolerancijom za čelo između $7\ \mu s$ i $9\ \mu s$, a za začelje $18\ \mu s$ do $22\ \mu s$). Primjenjuje se 5 udara na svaki uzorak, sa amplitudama od 0,01; 0,25; 0,5; 1 i 2 puta nazivna struja rasterećenja odvodnika.
- Sklopni strujni udarni talas (vreme čela strujnog talasa $30\ \mu s$ sa tolerancijom od 27 do $33\ \mu s$, a vreme začelja dvostruko vreme čela). Primjenjuje se samo po jedan talas amplitude koja je data u tablici 7.10.
- Pravougaoni talas

Napomena: Odvodnici klase 5 kA serije **A** se primenjuju u svim zemljama. Odvodnici klase 5 kA serije **B** se primenjuju u SAD, Kanadi i nekim drugim zemljama.

Klasa odvodnika za teške uslove rada u odnosu na struju dugog trajanja definisana je u tablici 7.10.

7.7.3 Preostali napon pri maloj struji odvodjenja

Kod ZnO odvodnika prenapona važno je sagledati ponašanje nelinearnih otpornika pri proticanju struje ispod kolena karakteristike preostalog napona, pre nego što odvodnik predje u fazu provodjenja struje. Pri ispitivanju se propušta omska komponenta struje od 1 mA do 5 mA i meri pad napona pri toj struji. U posmatranom režimu kroz odvodnik prenapona protiče i kapacitivna struja jer se on ponaša kao kondenzator sa gubicima.

U ovom testu se meri kapacitivna i omska komponenta struje pri trajnom radnom naponu. Važno je napomenuti da je neophodno meriti temperaturu ambijenta pri ovim ispitivanjima, jer karakteristike odvodnika u režimu malih struja jako zavise od njihove temperature.

7.7.4 Ispitivanje udarnom strujom dugog trajanja

Ispitivanja udarnom strujom dugog trajanja, koja je približno pravougaonog oblika, vrši se strujnim udarnim generatorom sa rasporedjenim parametrima. Ispitivanje se sprovodi na novim uzorcima nelinearnih otpornika nazivnog napona između 3 kV i 6 kV , sem u slučaju kada je naznačeni napon kompletnog odvodnika manji od 3 kV . Prethodno se odredi preostali napon uzorka pri nazivnoj struji odvodjenja, da bi se mogla detektovati eventualna odstupanja preostalog napona posle završene serije ispitivanja.

Ispitivanja se sprovode sa 18 udara, koji su podeljeni u 6 grupa sa po tri udara. Interval između udara treba da bude 50 s do 60 s , a između grupa toliki da se uzorak ohladi na temperaturu blisku temperaturi ambijenta. Snimanje preostalog napona na uzorku se vrši najmanje na prvom i poslednjem ispitivanju, da bi se mogle uočiti razlike pre i posle završene serije ispitivanja. Svi ostali uslovi ispitivanja su identični kao kod **SiC** odvodnika.

7.7.5 Ispitivanja u radnim uslovima

Ispitivanja **ZnO** odvodnika u radnim uslovima imaju za cilj da se proverí da li je odvodnik u stanju da se ohladi za vreme dok je priključen na napon industrijske učestanosti posle završetka proticanja udarne struje. Ukoliko odvodnik prenapona nije u stanju da se dovoljno ohladi, postoji mogućnost nastanka toplotnog pobega koji rezultira u termičkom razaranju odvodnika. Zbog toga je neophodno da se ispitivanje sprovodi na uzorcima od jedne ili više sekcija odvodnika koje imaju iste termičke karakteristike u stacionarnom i prelaznom režimu kao i kompletan odvodnik. Ispitivanja se sprovode na temperaturi ambijenta od $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Ispitivanja u radnim uslovima se vrše da simuliraju tri različita naprezanja odvodnika.

- Ispitivanja u radnim uslovima pri nazivnoj struji odvodjenja.
- Ispitivanja u radnim uslovima pri velikoj udarnoj struji.
- Ispitivanje stabilnosti odvodnika pri kombinovanom opterećenju.

U narednim poglavljima će biti objašnjena pojedina od ovih ispitivanja.

Ispitivanja ZnO odvodnika u radnim uslovima pri nazivnoj struji odvodjenja

Ispitivanja se sprovode na tri uzorka odvodnika, na kojima je prethodno odredjen preostali napon pri nazivnoj struji odvodjenja.

Ispitivanja se vrše strujnim talasima standardnog oblika $8/20 \mu s/\mu s$ i amplitude koja odgovara nazivnoj struji odvodjenja. Ispitni uzorak se priključuje na napon industrijske učestanosti čija je visina jednaka naznačenom naponu odvodnika. Okidanje strujnog generatora se vrši približno na električnih 60° pre nego što nastupa maksimalna vrednost napona. Polaritet struje treba da bude takav da proizvodi preostali napon istog polariteta kao što je polaritet radnog napona u trenutku okidanja udarnog generatora. Ispitivanja se rade sa 20 udara raspoređenih u 4 grupe od po 5 udara. Vremenska pauza između udara treba da bude $50 - 60 s$, a između grupa $25 - 30 min$. Udarni generator treba da se okine najviše za jednu sekundu nakon priključenja odvodnika na napon industrijske učestanosti amplitude jednake naznačenom naponu odvodnika, a za najviše $1 s$ posle okidanja potrebno je da se napon industrijske učestanosti snizi na vrednost $1,05$ od trajnog radnog napona.

Posle 20-tog udara primenjuje se napon na uzorku u visini od $1,05$ od trajnog radnog napona u trajanju od $30 min$. Trajna struja se registruje kroz uzorak u pauzi između udara dok je odvodnik podvrgnut naponu industrijske učestanosti. Takodje se snima i promena temperature uzorka odvodnika u cilju detekcije toplotnog pobega.

Nakon završetka ispitivanja, kada se uzorak ohladio na temperaturu blisku temperaturi ambijenta, ponavlja se snimanje preostalog napona pri nazivnoj struji odvodjenja, da bi se uporedili rezultati sa onima koji su snimljeni pre ispitivanja u radnim uslovima. Dozvoljava se promena u vrednosti preostalog napona od najviše 10% .

Ispitivanja ZnO odvodnika u radnim uslovima velikom strujom

Ovo ispitivanje ima za cilj da pokaže da li je odvodnik u stanju da podnese vrlo veliku struju pražnjenja. Ispitivanje se sprovodi na tri nova, prethodno neispitivana uzorka, na kojima se prvo odredi preostali napon pri nazivnoj struji odvodjenja.

Udarno ispitivanje se sprovodi strujama koje zavise od tipa odvodnika i date su tablično. Odvodnici prenapona se dele prema IEC preporuci [88] na odvodnike *X* tipa i odvodnike *Y* tipa prema uslovima ispitivanja. Odvodnici *X* tipa se ispituju sa dva udara udarnim strujama standardnog oblika $4/10 \mu s/\mu s$ prema tablici 7.11, a odvodnici *Y* tipa koji se rade za srednje napone za oblasti sa visokim intenzitetom atmosferskih pražnjenja se ispituju sa tri udara udarnim strujama čiji su oblik i amplituda dati u tablici 7.12.

Klasa odvodnika (kA)	Temena vrednost struje (kA)	Max.promena preostalog napona %
20,15,10 t.u i 10 l.u	65	10
5	40	10
2.5	25	10
1.5	10	10

Tabela 7.11: Standardne vrednosti nazivnih struja odvodjenja (*kA*) za odvodnike X tipa

Oznaka *t.u.* označava odvodnike za teške uslove rada, a *l.u* za lake uslove rada.

Klasa odvodnika (kA)	Oblik talasa $\mu s/\mu s$	Temena vrednost struje (kA)	Max.promena preostalog napona %
20t.u	30/80	40	10
20t.u	4/10	65	10

Tabela 7.12: Standardne vrednosti nazivnih struja odvodjenja (*kA*) za odvodnike Y tipa

Ispitivanje stabilnosti odvodnika pri kombinovanom opterećenju

Ispitivanja u radnim uslovima sa nazivnom strujom odvodjenja i velikom strujom odvodjenja bi trebalo da obuhvate naprezanja odvodnika usled kombinovanog naprezanja usled atmosferskog prenapona (koji se simulira udarnom strujom) i privremenog prenapona (koji se simulira naponom industrijske učestanosti visine koja je jednaka naznačenom naponu odvodnika).

Test sa kombinovanim opterećenjem se sprovodi da bi se pokazala sposobnost odvodnika da podnese naprezanja usled atmosferskih, sklopnih i privremenih prenapona. Pre ispitivanja se odredi preostali napon pri nazivnoj struji odvodjenja za svaki uzorak odvodnika. Ispitna procedura se sastoji iz serije različitih naponskih i strujnih naprezanja, koja su prikazana na slici 7.45.

7.7.6 Ispitivanje toplotne stabilnosti ZnO odvodnika prenapona

Trajna struja kroz odvodnik prenapona usled delovanja trajnog radnog napona se povećava sa porastom temperature odvodnika. Veličina struje ne zavisi samo od temperature odvodnika u posmatranom trenutku, već se može povećati usled dugotrajnog delovanja faznog napona ili velikih struja rasterećenja kroz odvodnik u toku njegove ranije eksploatacije. Na starenje odvodnika može uticati i razlaganje gasa u kućištu odvodnika pod uticajem korone, pa se ispitivanje stabilnosti odvodnika mora sprovoditi na odvodniku koji je smešten u kućište i nalazi se u potpuno istim uslovima kao i odvodnik u eksploataciji.

Za određivanje veka trajanja nelinearnog metal-oksidnog otpornika se predlaže Arrheniusova (Arrhenius) relacija za zavisnost životnog veka od temperature odvodnika:

$$t = t_o \cdot e^{\frac{T_o}{T}} \quad (7.27)$$

gde su:

t_o, T_o —konstante za određeni napon industrijske učestanosti,

T —apsolutna temperatura izmerena u stepenima Kelvinovim,

t —vreme (u godinama) nakon koga više odvodnik nije u stanju da ispuni zahteve iz ispitivanja u radnim uslovima.

Parametar t_o zavisi od primenjenog napona, dok parametar T_o ne zavisi od njega. Vrednosti parametra T_o se kreću od 9000 – 12000.

Proizvodjači odvodnika daju krivu $\log(t)$ u zavisnosti od $1/T$. Ova kriva se naziva kriva života odvodnika prenapona. Kriva života se određuje za trajni radni napon i 50 %, 60 %, 70 % i 80 % od naznačenog napona odvodnika.

Dobijena kriva života treba da daje bar 100 godina rada odvodnika pri trajnom radnom naponu i pri temperaturi od $45^\circ C$.

7.7.7 Ispitivanje toplotnog odziva odvodnika

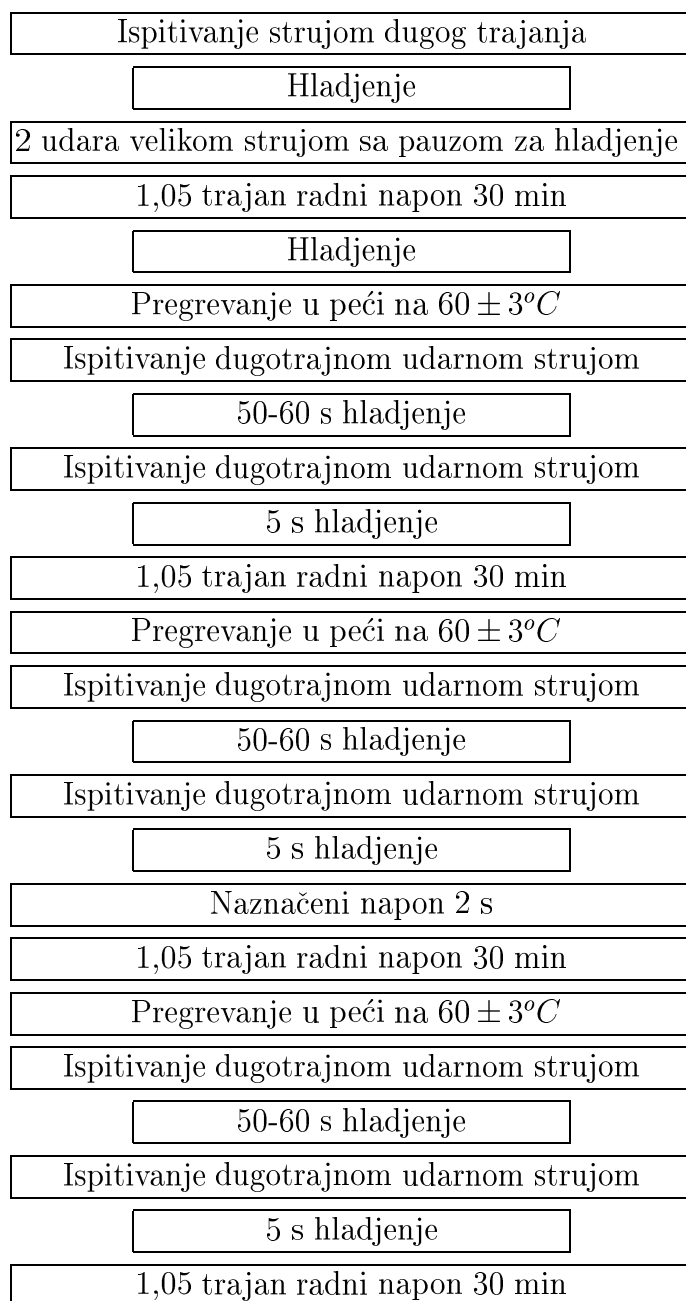
Ponašanje metal-oksidnog odvodnika prenapona u pogonu i pri ispitivanju u velikoj meri zavisi od njegove sposobnosti odavanja toplote. Stoga se predviđa mogućnost ispitivanja toplotnih karakteristika odvodnika kroz ispitivanje toplotnog odziva. U tu svrhu se odvodnik ili njegove sekcije smeštaju u kućište koje potpuno odgovara u pogledu odavanja toplote kućištu koje će biti primenjeno u pogonu. Uzorak se napaja naponom industrijske učestanosti tako odabrane visine da na uzorku posle nekog vremena nastupa toplotna ravnoteža koja odgovara normalnom stacionarnom pogonu odvodnika. Za vreme grejanja odvodnika se sa nekoliko termo-parova u tačkama koje su ravnomerno rasporedjene duž kućišta vrši merenje temperature. Pri tome su termo-parovi provučeni kroz male otvore na kućištu direktno do nelinearnih otpornika.

Ostali tipski testovi su slični kao kod SiC odvodnika, osim ispitivanja u zagadjenim uslovima, koja su veoma složena i neće biti razmatrana na ovom mestu.

7.7.8 Komadna i prijemna ispitivanja

Minimalna komadna ispitivanja koja se traže od metal-oksidnih odvodnika su ispitivanja preostalog napona pri maloj struji.

Ukoliko kupac traži prijemna ispitivanja, onda se ona rade na odredjenom broju uzoraka koji se odredjuju kao kubni koren iz isporučenog broja proizvedenih odvodnika. Na uzorcima se sprovodi ispitivanje preostalog napona pri nazivnoj struji odvodjenja, kao i merenje rezistivne i kapacitivne struje kroz odvodnik pri priključenom trajnom radnom naponu odvodnika.



Slika 7.45: Blok dijagram ispitivanja ZnO odvodnika u radnim uslovima kombinovanim opterećenjem

